
Untersuchung des solarenergetischen Betriebs einer Membrandestillationsanlage in Namibia

Bachelor- Thesis

Nadja Dohmen | Matrikelnummer: 1525597

Eingereicht am 18.05.2012

Gutachter: Prof. Dipl. – Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Betreuer: Dipl. – Ing. Marian Brenda

Untersuchung des solarenergetischen Betriebs einer Membrandestillationsanlage in Namibia
Bachelor- Thesis

Eingereicht von Nadja Dohmen

Matrikelnummer: 1525597

Studiengang: B. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Tag der Einreichung: 18.05.2012

Gutachter: Prof. Dipl. –Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Betreuer: Dipl. –Ing. Marian Brenda

Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
Institut IWAR
Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz

Zusammenfassung

Im Norden Namibias, vor allem im Cuvelai- Etosha Basin, herrscht eine sehr niedrige Niederschlagsrate und durch die hohen Verdunstungsraten, ist das Grundwasser sehr salzhaltig. Außerdem existieren dort keine ganzjährig wasserführenden Fließgewässer, wodurch die Bevölkerung Wasser beziehen könnte. Um die Wasserverteilung und Wassernutzung in diesem Gebiet zu optimieren wurde das Projekt CuveWaters gegründet. Die Versorgungssicherheit mit sauberem Wasser soll durch ein integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) erhöht werden. Hierzu werden Technologien aus unterschiedlichen Disziplinen verwendet. Eine dieser Technologien ist die Grundwasserentsalzung mithilfe einer Membrandestillationsanlage, welche von einer Photovoltaikanlage betrieben wird.

Ziel der Bachelor- Thesis ist die Untersuchung der Photovoltaikanlage, hinsichtlich der Stromproduktion, sowie der Membrandestillationsanlage, unter Beachtung des Energieverbrauchs, in Abhängigkeit der Witterungsverhältnisse, um Kapazitätsreserven zu identifizieren und die Auslastung dieser zu untersuchen. Dafür wird eine Energiebilanz der Anlagen erstellt. Die Energiereserven der Photovoltaikanlage werden bestimmt und es werden GOR- Werte für die MD- Module sowie für die gesamte Membrandestillationsanlage berechnet, um einen Aufschluss über die Effizienz der Anlagen zu bekommen.

Um alle Zusammenhänge zwischen dem Betrieb der einzelnen Anlagen besser zu verstehen, wird zunächst ein Überblick über die Grundlagen der Solarstrahlung, der Photovoltaik, der Wasserentsalzung und der Thermodynamik gegeben. Danach werden die Daten auf ihre Qualität hin überprüft, damit man ein aussagekräftiges Ergebnis erhält. Die Werte für die Globalstrahlung, welche auf eine geneigte Fläche gemessen wurden, werden auf die Horizontale umgerechnet, um diese mit Mittelwerten aus den vergangenen Jahren zu vergleichen. Daraufhin werden die Daten der Destillatproduktion sowie des Feed-Volumenstroms der Membrandestillationsanlage genauer betrachtet. Hierbei werden auch die Wärmemengenaufnahme der MD- Module sowie die GOR- Werte der Anlage näher untersucht. Die Batterien der Photovoltaikanlage werden hinsichtlich ihres Ladezustandes, der Temperatur und des Stromflusses geprüft. Zusätzlich werden Energiereserven, die die Batterien aufweisen, identifiziert. Durch den allgemeinen Verlauf der Daten können dann Zusammenhänge zwischen den einzelnen Anlagenteilen hergestellt werden. Außerdem wird eine Energiebilanz aufgestellt. Die Energiebilanz, die berechneten Energiereserven, die ermittelten Wärmemengenaufnahme der MD- Module und die bestimmten GOR- Werte sorgen dafür, dass mögliche Engpässe oder Kapazitätsreserven der Anlagen identifiziert werden können.

Abstract

The north of Namibia, especially the Cuvelai Etosha Basin is affected by very little annual rainfall quantities and high evaporation rates. Hence the groundwater is very saline. In addition there are no perennial rivers and comprehensive water sources are limited to the rainy season. In order to optimize the situation of water distribution and groundwater use the CuveWaters project was established. The supply guarantee of clean drinking water is supposed to be optimized by means of an Integrated Water Resource Management (IWRM) within the framework of this project. For this purpose technologies of different disciplines are being applied at present. One opportunity is the technology of groundwater desalination on the basis of a solar operating membrane distillation plant.

This thesis aims to investigate photovoltaic power plants with a focus on the production of electricity as well as the consumption of electricity of referring membrane distillation plants. In order to determine potential capacity reserves and the overall efficiency, local weather conditions are taken into account. Firstly an energy balance is generated. Secondly potential energy reserves of the photovoltaic power plants are determined. At last GOR-Values for the MD-Modules and for the overall membrane distillation plant are calculated in order to get an idea about the efficiency of the whole plant.

For a better understanding of the connections between the working processes of different parts of the plant, basic information about solar radiation, the technology of photovoltaic, water desalination and thermodynamics are given. Subsequently, data of the plants are verified referring to their quality in order to get a significant result. Global radiation was detected on a sloping area and determined values have to be converted to the respective horizontal area. So, resulting data can be compared to mean values of former years. Next, data relating to the distillate production and the feed volume flow are taken into closer consideration. Likewise the absorbed heat volume of the MD-Models, as well as GOR-Values of the plant are analysed. Furthermore accumulators connected to the photovoltaic power plants are tested referring to their charge state, temperature and current conduction. Moreover energy reserves of the accumulator are determined. Using the development of the data, it is possible to point out connections between single parts of the plant. Besides, an energy balance is modeled. Linked to calculated energy reserves, determined heat flows to the MD-Modules and detected GOR - Values, it is now possible to identify potential shortages or capacity reserves of the plant.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Mathematische Symbole	IX
1. Einführung	1
1.1. Das Projekt CuveWaters	1
1.1.1. Grundwasserentsalzung im Projekt CuveWaters	3
1.2. Ziel der Arbeit	4
1.3. Vorgehen und Struktur der Arbeit	4
2. Grundlagen	5
2.1. Solarstrahlung	5
2.1.1. Physikalische Grundlagen	5
2.1.2. Beeinflussung der Strahlung durch die Erdatmosphäre	6
2.1.3. Einfluss des Wetters auf die Globalstrahlung	6
2.1.4. Methoden zur Messung der Einstrahlung	7
2.1.5. Datenbanken für Strahlungswerte	8
2.1.6. Umrechnung der gemessenen Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche	8
2.2. Photovoltaik	11
2.2.1. Physikalische Grundlagen bzw. -begriffe	11
2.2.2. Funktionsprinzip von Solarzellen	12
2.2.3. Wirkungsgrad	13
2.2.4. Photovoltaik- Inselsysteme	14
2.3. Wasserentsalzungsverfahren	14
2.3.1. Umkehrosmose (RO)	15
2.3.2. Nanofiltration (NF)	16
2.3.3. Elektrodialyse (ED)	16
2.3.4. Destillation	17
2.3.5. Membrandestillation	18
2.4. Thermodynamik	21
2.4.1. Wärme	21
2.4.2. Wärmeübertragung	22
2.4.3. GOR	24
3. Datenauswertung	25
3.1. Qualität der Daten	25
3.1.1. Messdaten des Fraunhofer-Instituts	25
3.1.2. Messdaten der Firma juwi	26

3.1.3.	Messdaten der Firma proaqua GmbH	26
3.2.	Globalstrahlung am Standort Amarika	27
3.3.	Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage	31
3.3.1.	Energieaufnahme der MD- Module	32
3.3.2.	GOR- Werte	35
3.4.	Betriebsdaten der Photovoltaikanlage	38
4.	Identifizierung von Kapazitätsreserven	42
4.1.	Auswirkungen der Globalstrahlung auf den Betrieb der Membrandestillations- sowie Photovoltaikanlage	42
4.2.	Energiebilanz der gesamten Anlage	46
4.3.	Energiereserven	48
5.	Fazit	51
Anhang		I
A.	Datenqualität der Messdaten des Fraunhofer-Instituts ISE	I
B.	Datenqualität der Messdaten der Firma juwi	IV
C.	Datenqualität der Messdaten der Firma proaqua GmbH	VI
D.	Bestimmung des Deklinationswinkels δ und der Zeitgleichung ZGL	VII
E.	Globalstrahlung am Standort Amarika	IX
F.	Energieaufnahme der MD- Module	XIV
G.	GOR- Werte	XVII
H.	Betriebsdaten der Photovoltaikanlage	XIX
I.	Energiebilanz der gesamten Anlage	XX
J.	Plateaudauer	XXII
K.	Energiereserven	XXIV
Literaturverzeichnis		XXVI
Eidesstattliche Erklärung		XXIX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Cuvelai- Etosha Basin in Nord Namibia	1
Abbildung 1-2: Karte des Projektgebiets mit den Anlagenstandorten	2
Abbildung 1-3: Grundwasserentsalzungsanlagen in Amarika	4
Abbildung 2-1: Wechselwirkung von Strahlung und Materie	5
Abbildung 2-2: Elektromagnetisches Strahlungsspektrum.....	6
Abbildung 2-3: Globalstrahlung von Afrika und Europa.....	8
Abbildung 2-4: Definition der Winkel.....	9
Abbildung 2-5: Darstellung einer p- und n- Dotierung von Silizium.....	12
Abbildung 2-6: Funktionsprinzip einer Solarzelle	13
Abbildung 2-7: Typische Verluste und Wirkungsgradanteile von Solarzellenanlagen	13
Abbildung 2-8: Wirkungsgradbereiche verschiedener Zelltypen	14
Abbildung 2-9: Entsalzungsverfahren	15
Abbildung 2-10: Prinzip der Umkehrosmose.....	16
Abbildung 2-11: Prinzip der Elektrodialyse.....	16
Abbildung 2-12: Fließbild einer konventionellen Mehrstufen- Entspannungsverdampfungsanlage (MSF).....	17
Abbildung 2-13: Schematischer Darstellung eines Permeat Gap MD	19
Abbildung 2-14: schematische Darstellung eines Spiralwickels	20
Abbildung 2-15: Schematische Darstellung des Zweikreisssystems.....	21
Abbildung 2-16: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe bei 20°C und 100kPa	23
Abbildung 3-1: Globalstrahlung am 01.05.2011 und am 26.05.2011	28
Abbildung 3-2: Mittelwerte der Globalstrahlung auf die geneigte Fläche (I_{dm}) und auf die horizontale Fläche (I_d).....	29
Abbildung 3-3: Vergleich der Monatsmittelwerte der Globalstrahlung auf die Horizontale von der NASA- Datenbank und von Amarika	30
Abbildung 3-4: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage am 01.05.2011	31
Abbildung 3-5: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage am 26.05.2011	31
Abbildung 3-6: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage von Mai bis Juli	32
Abbildung 3-7: Wärmeaufnahme der MD- Module über den Tag vom 01.05 und 26.05.2011	33

Abbildung 3-8: Monatsmittelwerte der Energieaufnahme MD- Module und der Strahlungswerte	34
Abbildung 3-9: GOR- Monatsmittelwerte.....	36
Abbildung 3-10: GOR- Werte von Mai bis Juli 2011.....	37
Abbildung 3-12: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage am 01.05.2011	39
Abbildung 3-13: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage am 26.05.2011	39
Abbildung 3-14: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage am 07.06.2011	41
Abbildung 4-1: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage im Vergleich mit der Globalstrahlung am 26.05.2011	42
Abbildung 4-2: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage im Vergleich mit der Globalstrahlung am 01.05.2011	43
Abbildung 4-3: Betriebsdaten der Membrandestillationsrate vom 01.05 bis zum 20.05.2011	44
Abbildung 4-4: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage im Vergleich mit der Globalstrahlung am 26.05.2011	44
Abbildung 4-5: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage im Vergleich mit der Globalstrahlung am 26.05.2011	45
Abbildung 4-6: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage vom 15.06. bis zum 23.06.2011	46
Abbildung 4-7: Energiebilanz der gesamten Anlage	48
Abbildung 4-8: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage am 26.05.2011	49
Abbildung 4-9: Energiereserven.....	50
Abbildung E-1: Monatsmittelwerte der Globalstrahlung auf die geneigte und die horizontale Fläche	XI
Abbildung E-2: Tageswerte der Globalstrahlung auf die geneigte und horizontale Fläche	XI
Abbildung E-3: Globalstrahlung im Mai 2011 auf die horizontale Fläche	XII
Abbildung E-4: Globalstrahlung im Juni 2011 auf die horizontale Fläche	XII
Abbildung E-5: Globalstrahlung im Juli 2011 auf die horizontale Fläche	XIII
Abbildung F-6: Energieaufnahme der MD- Module im Verhältnis zur Globalstrahlung	XVI
Abbildung H-7: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage im Mai 2011	XIX
Abbildung H-8: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage im Juni 2011	XIX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Abschätzung der Einstrahlung bei unterschiedlicher Bewölkung	7
Tabelle 2-2: Thermodynamische Eigenschaften von Wasser	22
Tabelle 3-1: Monatsmittelwerte der Globalstrahlung am Standort Amarika von der NASA-Datenbank.....	30
Tabelle 4-1: Energiebedarf der Anlagen in Amarika.....	47
Tabelle 4-2: Energieverbräuche der Anlagenteile.....	49
Tabelle A-1:Qualitätsbewertung der Messdaten des Fraunhofer- Instituts ISE	I
Tabelle B-2: Qualitätsbewertung der Messdaten der Firma juwi	IV
Tabelle C-3: Qualitätsbewertung der Messdaten der Firma proaqua GmbH	VI
Tabelle D-4: Bestimmung des Deklinationswinkels und der Zeitgleichung	VII
Tabelle E-5: Globalstrahlungswerte auf die geneigte und die horizontale Fläche	IX
Tabelle E-6: Monatsmittelwerte der Globalstrahlung auf die geneigte und die horizontale Fläche	X
Tabelle F-7: Energieaufnahme der MD- Module im Verhältnis zur Globalstrahlung auf die geneigte Fläche	XIV
Tabelle G-8: GOR- Werte für die MD- Module und für das gesamt System.....	XVII
Tabelle I-9: Energiebilanz der Anlagen in Amarika	XX
Tabelle J-10: Plateaudauer	XXII
Tabelle K-11: Berechnung der Energiereserven.....	XXIV

Abkürzungsverzeichnis

AAM	Anionenaustauschermembran
AGMD	Air Gap Membrandestillationsverfahren
Bzw.	Beziehungsweise
ca.	circa
DCMD	Direct Contact Membrandestillationsverfahren
ER	Energiereserve
EV	Energieverbrauch
Fraunhofer ISE	Fraunhofer- Institut für Solare Energiesysteme
GOR	Gained- Output- Ratio
GS	Globalstrahlung
IWRM	Integrated Water Resources Management
KAM	Kationenaustauschermembran
MD	Membrandestillation
MED	Vielfachverdampfungsanlage
MEH	Multi- Effect- Humidification
MSD	Multi Stage Desalination
MSF	Mehrstufen- Entspannungsverdampfungsanlage
PGMD	Permeat Gap Membrandestillationsverfahren
PV	Photovoltaik
RO	Umkehrosmose (Reverse Osmosis)
SWGMD	Sweeping Gas Membrandestillationsverfahren
UTC	Universal Time Coordinated
VCMD	Vacuum Membrandestillationsverfahren
ZGL	Zeitgleichung der Sonnenzeit

Mathematische Symbole

α, α_m	Drehung aus Südrichtung der Solarpanels
β, β_m	Neigung der Solarpanels
δ	Deklinationwinkel
ω	Stundenwinkel
θ	Einfallswinkel
n	Nummer des betrachteten Tages im Jahr
t_s	Sonnenzeit
t	Gesetzlich geltende Zeit
λ_0	Bezugsmeridian der gesetzlich geltenden Zeit
λ	Längengrad des Standortes
β	Sonnenhöhenwinkel
α_s	Sonnenazimutwinkel
ϕ	Breitengrad des Standortes
I_m	Direkte Sonnenstrahlung auf geneigte Fläche
I_d	Tägliche Direktstrahlung (Tagessumme)
I_{dm}	Tägliche direkte Sonnenstrahlung auf geneigte Fläche Tagessumme
ω_a	Stundenwinkel bei Sonnenaufgang bzgl. der horizontalen Fläche
ω_u	Stundenwinkel bei Sonnenuntergang bzgl. der horizontalen Fläche
ω_a^*	Stundenwinkel bei Sonnenaufgang bzgl. der geneigten Fläche
ω_u^*	Stundenwinkel bei Sonnenuntergang bzgl. der geneigten Fläche
ΔT	Temperaturdifferenz
ΔQ	Wärmemenge
C	Wärmekapazität
c_p	Spezifische Wärmekapazität
m	Masse
\dot{Q}	Wärmestrom
λ	Wärmeleitfähigkeit
A	Fläche
T	Temperatur

d	Dicke eines Stoffes
Q	Wärmemenge
\dot{q}	Wärmestromdichte
GOR	Gained- Output- Ratio
\dot{m}_{Ko}	Destillatproduktionsrate
r_{Ko}	Spezifische Verdampfungswärme
\dot{Q}_{zu}	Wärmemenge, die der Anlage zugeführt wird

1. Einführung

Namibia liegt im Süden von Afrika und grenzt an Angola, Sambia, Botswana, Südafrika und an den Atlantischen Ozean. Das Land hat nur etwa 2 Millionen Einwohner, obwohl es im Vergleich zu Deutschland fast doppelt so groß ist. Es gehört somit zu einem der am dünnsten besiedelten Länder der Erde (www.africandesk.com).

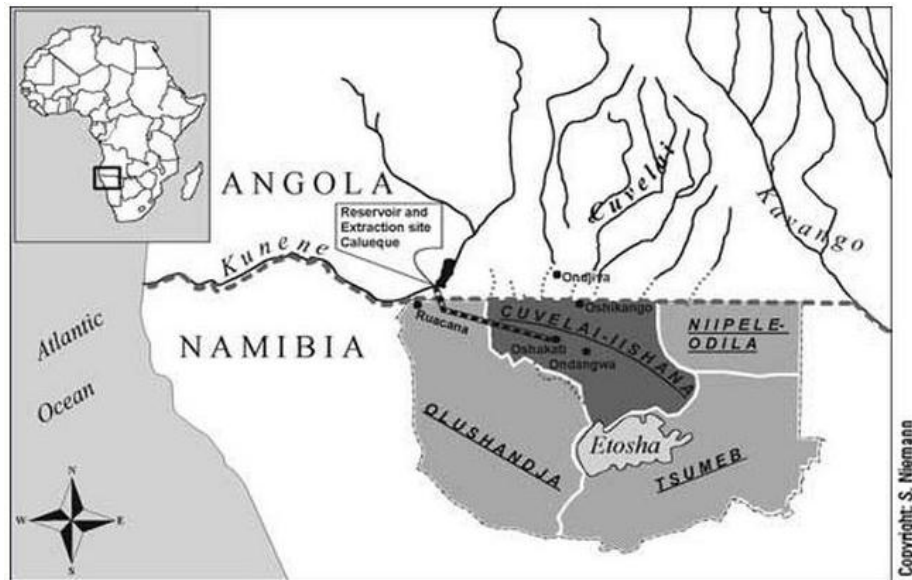


Abbildung 1-1: Cuvelai- Etosha Basin in Nord Namibia

(Jahn Dr., CUVEwaters Impressions, 2010)

Namibia ist das trockenste Land südlich der Sahara. Im Norden, beim Cuvelai- Etosha Basin, lebt ca. die Hälfte der gesamten namibischen Bevölkerung. Die Sicherstellung einer ausreichenden Wasserversorgung für die dort lebende Bevölkerung sowie für die Landwirtschaft ist schwierig. Das Klima wechselt zwischen Dürren und Überflutungen, es gibt keine permanent wasserführenden Fließgewässer und das Grundwasser ist teilweise dreimal so salzhaltig wie Meerwasser. Dabei ist die Versorgung der Bevölkerung mit sauberem Wasser sehr wichtig, da es durch verunreinigtes Wasser zu Krankheiten kommen kann und hierdurch die Lebenserwartung sinkt. Außerdem stellen die hohe Bevölkerungsdichte, mit einem jährlichen Bevölkerungswachstum von 2,1%, die immer mehr zunehmende Urbanisierung und die Verschlechterung der Bodeneigenschaften eine Beeinträchtigung des Ökosystems dar (Jahn Dr., CuveWaters Project Background, 2010).

Zu dem Dorf Amarika, welches vorwiegend in der vorliegenden Bachelor-Thesis behandelt wird, zählten 2010 fünfzig Haushalte mit jeweils ca. 10 Personen pro Haushalt. Die Niederschlagsrate liegt dort bei 470 mm/a und die Verdunstungsrate bei 2700 mm/a, wodurch es zu dem hohen Salzgehalt des Grundwassers kommt (CuveWaters, 2010).

1.1. Das Projekt CuveWaters

Um eine Verbesserung der Wasserver- und -entsorgung zu erzielen, wurde 2006 das internationale Projekt CuveWaters gegründet. Dieses konzentriert sich vornehmlich auf das nord- namibische Gebiet des Cuvelai- Etosha Basin und versucht durch ein integriertes Wasserressourcen- Management (IWRM) die Versorgungssicherheit der Bewohner dieses Gebietes mit Wasser zu erhöhen und sie auf die Folgen des Klimawandels vorzubereiten.

Der Forschungsansatz ist transdisziplinär und verbindet Wissenschaft, Gesellschaft und neue Technologie miteinander.

Um dies verwirklichen zu können, arbeiten Wissenschaftler verschiedener Disziplinen mit Spezialisten, aber auch mit den Menschen dieser Region, eng zusammen. Die Bewohner werden vor Ort für den Bau, die Bedienung und Wartung der Anlagen ausgebildet, wodurch die Arbeitslosigkeit und die Armut gesenkt werden.

Die verschiedenen Disziplinen zur Aufbereitung und Gewinnung von Wasser umfassen Pilotanlagen für die Regenwassersammlung, für unterirdische Wasserspeicherung, für ein städtisches Abwasser- und Sanitärkonzept sowie für die solargekoppelte dezentrale Grundwasserentsalzung. Hierbei entstehen Wässer unterschiedlicher Qualitäten, die dementsprechend genutzt werden. Sehr sauberes Wasser wird als Trinkwasser genutzt und Wasser mit geringer Qualität wird für die Bewässerung der Gärten genutzt (Jahn Dr., CuveWaters Project Background, 2010)(Krug von Nidda, A.)(Eisold Dr. & Benzing Dr., 2010).

In der nachfolgenden Abbildung 1-2 ist das Projektgebiet mit den Standorten der verschiedenen Anlagen zu sehen.

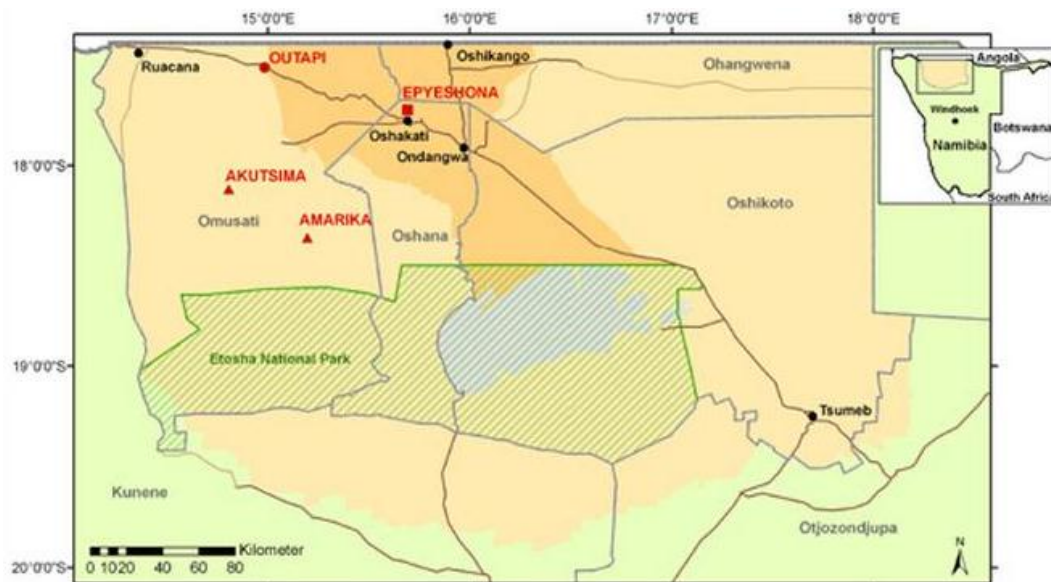


Abbildung 1-2: Karte des Projektgebiets mit den Anlagenstandorten
(Jahn Dr., CuveWaters Impressions, 2010)

Das Projekt umfasst drei Phasen. Die erste Phase wurde 2009 erfolgreich abgeschlossen und basierte in erster Linie auf der Koordination vor Ort mit Entscheidungsträgern über die Planung und Forschung des Projektes. Die zweite Phase, auch Implementierungsphase, läuft zurzeit und endet voraussichtlich Mitte 2013. Ziel ist die Installation der Pilotanlagen, sowie deren Inbetriebnahme und Beaufsichtigung. Die dritte und letzte Phase beabsichtigt die Installation weiterer erfolgreicher Technologien an anderen Standorten in Namibia und Südafrika. Hierzu soll das Konzept weiter ausgedehnt und fortgesetzt werden (Eisold Dr. & Benzing Dr., 2010).

1.1.1. Grundwasserentsalzung im Projekt CuveWaters

In der Region des Cuvelai- Etosha Basin existiert kein permanent wasserführendes Fließgewässer. Deshalb nutzen die Menschen dort Wasser, welches sie aus teilweise 20 m tiefe, handgegrabene Brunnen entnehmen. Jedoch versalzt das Grundwasser in der Trockenzeit durch die hohen Verdunstungsraten stark und die Belastungen des Wassers durch Fäkalien, Parasiten und Algen ist schwerwiegend.

Somit wurden auf der Grundlage des CuveWaters Projekt in zwei Dörfern Grundwasserentsalzungsanlagen errichtet und 2010 eröffnet. Diese Anlagen bringen hohe Investitionskosten und einen hohen Energiebedarf mit sich, weshalb sie nur als letzte Alternative zum Einsatz kommen. Wegen des hohen Energiebedarfs werden sie hundertprozentig durch Photovoltaikanlagen betrieben. Da das Strahlungsangebot in dieser Gegend mit über $6,2 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{d}$ relativ hoch ist, eignet es sich somit sehr gut als Energiequelle. Herkömmliche Energiequellen kommen wegen dem schlecht ausgebauten oder gar nicht vorhandenen Infrastrukturnetz nicht in Frage.

Als Ausgangspunkt des Multi-resource mix wurden vier auf unterschiedlichen Technologien basierenden Grundwasserentsalzungsanlagen, jeweils zwei in Akutsima und in Amarika, errichtet.

In dem Dorf Akutsima wurde eine Anlage des Solarinstitut Jülich von dem Ingenieurbüro IBEU entwickelt, welche nach dem Prinzip der Multi Stage Desalination (MSD) arbeitet und eine Kapazität von 600 l/d hat. Die zweite Wasserentsalzungsanlage in Akutsima hat eine Kapazität von $3,5 \text{ m}^3/\text{d}$ und wurde nach dem Verfahren der Multi-Effect-Humidification (MEH) der Firma Terrawater errichtet. Hier wird das zurückbleibende Konzentrat in einem Verdunstungsbecken verdampft.

In Amarika hingegen wurde eine Umkehrosmoseanlage (RO) der Firma proaqua und eine Membrandestillationsanlage (MD) des Fraunhofer Instituts für solare Energiesysteme (ISE) errichtet. Beide Anlagen haben eine Kapazität von $5 \text{ m}^3/\text{d}$. Bei diesen beiden Anlagen wird das Konzentrat in tiefere Grundwasserschichten infiltriert. Nur der Teil des Konzentrats, den die Schluckbrunnen wegen ihrer geringen Kapazität nicht aufnehmen können, wird verdampft. Für die Versorgung mit Energie wurde in Amarika eine Photovoltaikanlage mit einer Kollektorfläche von 142 m^2 erbaut (Eisold Dr. & Benzing Dr., 2010)(Brenda, M.) (CuveWaters, 2010).



Abbildung 1-3: Grundwasserentsalzungsanlagen in Amarika
(Jahn Dr., CuveWaters Impressions, 2010)

1.2. Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die Auslastung der Photovoltaikanlage, welche die Meerwasserentsalzungsanlagen in Amarika mit Strom versorgt, sowie der Membrandestillationsanlage zu untersuchen und mögliche Kapazitätsreserven zu identifizieren. Es soll untersucht werden inwieweit sich die Stromproduktion und der Stromverbrauch decken. Hierzu wurde der Zeitraum Mai bis Juli 2011 gewählt. Es handelt sich hierbei um die namibischen Wintermonate, in denen mit weniger Globalstrahlung zu rechnen ist. Demnach kann untersucht werden inwieweit die Photovoltaikanlage, auch in sonnenschwachen Monaten, Energie produziert.

1.3. Vorgehen und Struktur der Arbeit

Das folgende zweite Kapitel gibt einen Überblick über die Grundlagen der Bachelor- Thesis. Diese umfassen im allgemeinen die Solarstrahlung, die Funktionsweise der Photovoltaik, die verschiedenen Arten der Wasserentsalzungsverfahren, vor allem die Membrandestillation, und Grundlagen der Thermodynamik.

Im dritten Kapitel werden die Daten der Globalstrahlung, der Membrandestillationsanlage sowie der Photovoltaikanlage zunächst auf ihre Qualität, durch die Untersuchung auf Vollständigkeit, Korrektheit sowie auf Konsistenz, hin überprüft. Daraufhin werden die Betriebsdaten dargestellt und analysiert. Außerdem werden die GOR- Werte der Membrandestillationsanlage berechnet.

Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit der Identifizierung der Kapazitätsreserven der Anlagen. Hierzu werden die Zusammenhänge, auf Grundlage der Ergebnisse von Kapitel 3, zwischen der Globalstrahlung und dem Betrieb der Anlagen dargestellt und ausgewertet. Desweiteren werden eine Energiebilanz erstellt und die Energiereserven identifiziert.

Kapitel 5 dient dazu ein Fazit über über die ermittelten Ergebnisse zuziehen.

2. Grundlagen

2.1. Solarstrahlung

Für die Nutzung von Solarthermie- und Photovoltaikanlagen wird die Strahlung der Sonne benötigt. Die Dimensionierung erfolgt nach dem nutzbaren Strahlungsangebot der Sonne sodass damit der voraussichtliche Ertrag prognostiziert werden kann. Hierfür sind vor allem die spektrale Zusammensetzung der Solarstrahlung, sowie die geographische Lage und Ausrichtung, zum Beispiel der Solarpanels, von Bedeutung (Wesselak & Schabbach, 2009).

2.1.1. Physikalische Grundlagen

Zunächst werden einige physikalische Grundlagen hinsichtlich der Solarstrahlung näher betrachtet, da sie für das weitere Verständnis der Bachelor-Thesis von Bedeutung sind.

Es gibt verschiedene Arten, wie man sich Strahlung vorstellen kann. Zum einen gibt es die Auffassung als Teilchen, Photon oder als Welle. Ein Photon bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit und wenn es auf eine Materie stößt gibt es entweder keine oder direkt seine gesamte Energie an das Atom ab. Dies liegt daran, dass seine Energie gequantelt ist und es nur als Ganzes entstehen oder verschwinden kann. Wenn es nun seine gesamte Energie an die Materie abgibt, existiert das Photon danach nicht mehr. Es wird komplett absorbiert (Absorption). Falls dies jedoch nicht der Fall ist, gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten wie sich das Photon verhält. Zum einen kann es die Materie durchdringen (Transmission) oder zum anderen kann es an der Oberfläche der Materie reflektiert werden. Wenn die Reflexionsrichtung mit dem Einfallswinkel des Photons in Zusammenhang steht nennt man diesen Vorgang Reflexion, ansonsten Streuung (Wesselak & Schabbach, 2009).

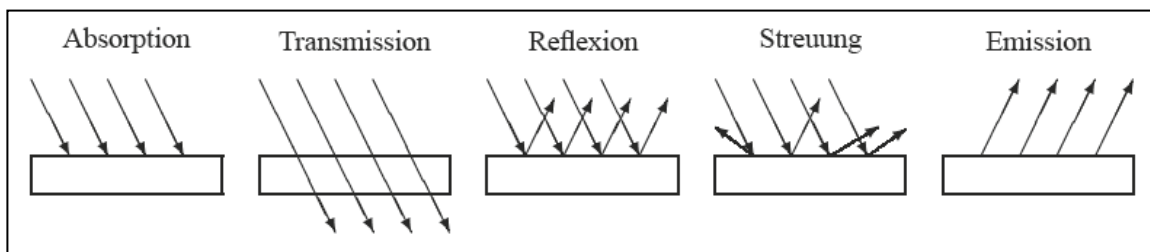


Abbildung 2-1: Wechselwirkung von Strahlung und Materie

(Wesselak & Schabbach, 2009)

Die Art des Auftreffens des Photons auf die Materie hängt von der atomaren Struktur oder Oberfläche der Materie ab, wonach diese auch unterschieden werden. Schwarze Stoffe absorbieren alle Photonen, wohingegen sie von weißen Stoffen reflektiert werden. Bei selektiven Stoffen werden nur Photonen, welche aus bestimmten Spektralbereichen stammen, absorbiert, während bei grauen Stoffen bzw. Oberflächen gleichmäßige Photonen, wobei die Wellenlänge unabhängig ist, absorbiert werden.

Strahlung als Welle ist abhängig von der Energie und von der Frequenz des Photons. Das Licht, welches für das menschliche Auge sichtbar ist, umfasst nur einen kleinen Bereich von 380 bis 780 nm (Wesselak & Schabbach, 2009).

Die nachfolgende Abbildung 2-2 stellt das gesamte elektromagnetische Strahlungsspektrum dar.

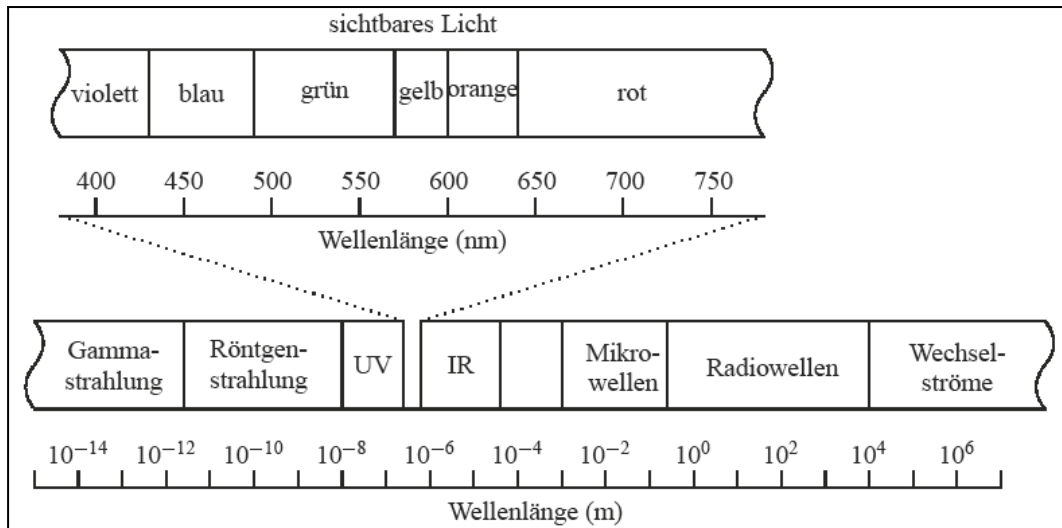


Abbildung 2-2: Elektromagnetisches Strahlungsspektrum
(Wesselak & Schabbach, 2009)

An das für das menschliche Auge sichtbare Licht grenzen im unteren Bereich die Ultraviolettstrahlung (UV) und im oberen Bereich die Infrarotstrahlung (IR), welche auch für solare Anwendungen relevant ist.

2.1.2. Beeinflussung der Strahlung durch die Erdatmosphäre

Wenn Strahlungsteilchen in die Erdatmosphäre dringen, kommt es zu unterschiedlichen Wechselwirkungen, wie es im vorherigen Kapitel schon beschrieben wurde. Hierdurch kommt es dazu, dass ein Teil der Strahlung gerichtet und ein Teil ungerichtet verläuft. Somit wird die Globalstrahlung in Diffus- oder Himmelsstrahlung unterteilt. Der Anteil D beschreibt hierbei den ungerichteten und der Anteil I den gerichteten Teil.

Die Himmelsstrahlung wird in Rayleigh- Streuung und in Mie- Streuung gegliedert. Unter Rayleigh- Streuung werden Streuvorgänge an Molekülen, welche einen kleineren Durchmesser als die Wellenlänge des Lichts haben, verstanden. Mie- Streuung wird durch Aerosole, wie Wasserdampf oder Rußpartikel, verursacht. Dabei müssen die Teilchen der Aerosole größer oder mindestens genauso groß sein wie die Wellenlänge des Lichtes. Außerdem zählen auch die Mehrfachreflexionen, welche zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre zustande kommen, zur Diffusstrahlung. Diffuse Strahlung ist jedoch nur in geringen Teilen für eine technische Nutzung geeignet. Vorwiegend wird die Direktstrahlung genutzt um Strom zu erzeugen. Wenn der Himmel wolkenfrei ist, tritt somit häufiger die Rayleigh- als die Mie- Streuung auf. Jedoch trifft insgesamt nur rund 47 % der gesamten Strahlungsleistung der Sonne (22% direkte und 25% diffuse Strahlung) auf die Erdoberfläche (Wesselak & Schabbach, 2009).

2.1.3. Einfluss des Wetters auf die Globalstrahlung

Wie viel Strahlung auf die Erdoberfläche auftrifft, hängt stark vom Wetter und vom Bewölkungsgrad ab. Hierzu wird zwischen wolkenlosem und bewölktem Himmel unterschieden.

Das Modell auf Basis des Linke- Trübungsfaktors bezieht den Bewölkungsgrad mit ein, indem der Gesamtbedeckungsgrad des Himmelhalbraums mit Wolken abgeschätzt wird. Dies wird durch $N/8$ ausgedrückt. N wird nach der folgenden Tabelle 2-1 definiert.

Wetter	N	G _N /G	D _N /G _N
wolkenlos, sonnig	0	100%	10 - 20%
leicht bewölkt, heiter	1 - 3	95 - 100%	20 - 50%
wolkig	4 - 6	60 - 95%	50 - 75%
stark bewölkt	7	40 - 60%	75 - 95%
bedeckt	8	10 - 40%	100%

Tabelle 2-1: Abschätzung der Einstrahlung bei unterschiedlicher Bewölkung
(Wesselak & Schabbach, 2009)

Die Tabelle 2-1 stellt das Verhältnis von Globalstrahlung bei wolkenlosem und bedecktem Himmel dar, sowie das Verhältnis von Diffusstrahlung zur Globalstrahlung. Daraus ist erkennbar, dass selbst wenn der Himmel vollkommen bedeckt ist noch 10 bis 40% der Globalstrahlung auf die Erde treffen. Obwohl die Strahlung zu diesem Zeitpunkt zu 100% aus Diffusstrahlung besteht ist sie energetisch nutzbar.

Diese Abschätzung ist jedoch nur sinnvoll, wenn man sie über einen bestimmten Zeitraum zur Berechnung der Diffusstrahlung nutzt, da die Bestimmung des Bewölkungsgrads nur eine Wahrscheinlichkeit angibt (Wesselak & Schabbach).

2.1.4. Methoden zur Messung der Einstrahlung

Zur Vor- Ort- Messung der Globalstrahlung kommen zwei Messsysteme in Frage, zum einen das Pyranometer und zum anderen das Messen mit Silizium- Strahlungssensoren.

Die Strahlung wird bei einem Pyranometer auf eine schwarze Absorberfläche gerichtet. Dort wird Solarenergie in Innere Energie umgewandelt und es kommt zu einer Erwärmung, die durch ein Thermoelement gemessen wird und proportional zur Sonneneinstrahlung entsteht. Durch die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur entsteht Spannung. Die Messergebnisse dieses Verfahrens sind sehr genau und liegen bei ca. 99%, jedoch ist dieses System verhältnismäßig teuer.

Eindeutig günstiger ist das Messen mit Silizium- Strahlungssensoren. Hierbei handelt es sich um eine geeichte Solarzelle, die proportional zur Einstrahlung Strom erzeugt. Ein großer Nachteil dieser Methode ist, dass der Empfänger auf ein festes Bezugsspektrum geeicht wird und somit nicht alle Wellenlängen erfassen kann. Im Gegensatz zum Pyranometer, welches praktisch unabhängig von der Wellenlänge agiert, weisen somit Silizium- Strahlungssensoren eine Messabweichung von unter 10% auf (Wesselak & Schabbach, 2009) (Quasching, V., 2001).

Das Sternpyranometer, das in Amerika verwendet wird, ist eine besondere Form des Pyranometers. Hierbei sind schwarze und weiße Kupferplättchen sternförmig angeordnet. Das Prinzip hierbei beruht darauf, dass der Temperaturunterschied der schwarzen und weißen Flächen gemessen wird und hierdurch eine Beeinflussung der Umgebungstemperatur unterbleibt. Die Temperaturdifferenz der schneller erwärmenden schwarzen Flächen und der weißen Flächen wird durch ein Thermoelement erfasst und in Spannung verwandelt,

wodurch die Einstrahlung gemessen werden kann (Feingerätebau K. Fischer GmbH, 2004/2005).

2.1.5. Datenbanken für Strahlungswerte

Da das Bestimmen der Globalstrahlung mit großen Unsicherheitsfaktoren behaftet ist, sollte man, um eine gute Messqualität zu erzielen, über einen längeren Zeitraum Daten über die Strahlung ermitteln. Jedoch ist die Ermittlung der Strahlung über einen längeren Messzeitraum sehr aufwendig, weshalb es sich anbietet eine Datenbank für Strahlungswerte zu verwenden. Hierzu zählen unter anderem die NASA- Datenbank, das Programm Meteonorm oder das Programm SolarGIS, welche über Jahre Daten der Globalstrahlung aufnehmen und analysieren.

Im Folgenden werden die Daten, vom Programm SolarGIS, für die Globalstrahlung von Afrika sowie die von Europa gegenübergestellt:

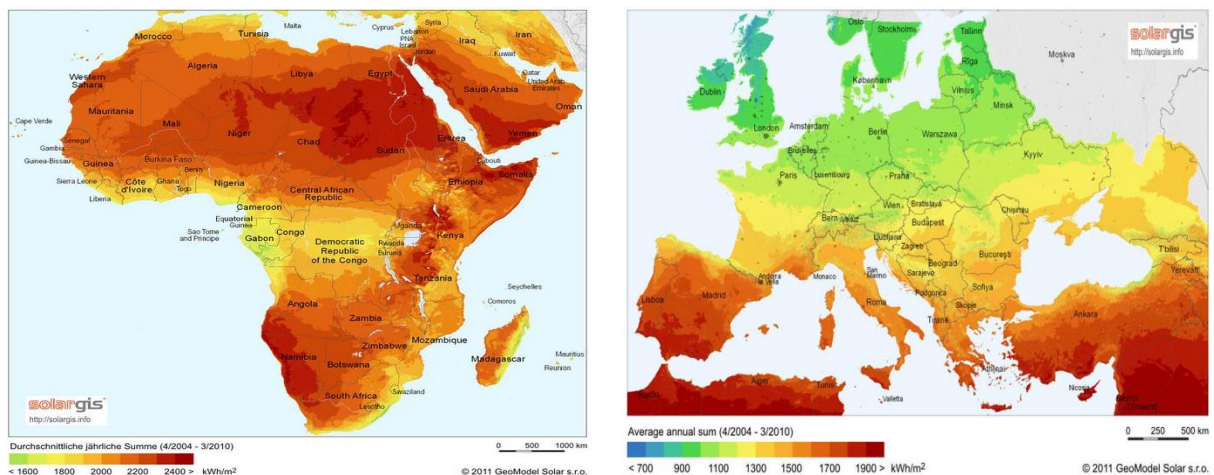


Abbildung 2-3: Globalstrahlung von Afrika und Europa

(Quelle: SolarGIS,)

Man erkennt, dass die Globalstrahlung in Afrika um vieles höher ist, als die in Europa. Vor allem der Vergleich der Jahressummen zwischen Deutschland, welche eine Globalstrahlung von zwischen 1000 und 1200 kWh/m² aufweist, und Namibia, mit einer Globalstrahlung zwischen 2200 bis 2400 kWh/m², zeigt wie hoch der Unterschied ist. Somit ist zu erkennen, dass eine Nutzung von Solarenergie in Namibia wesentlich effektiver ist als in Deutschland.

2.1.6. Umrechnung der gemessenen Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche

Die gemessene Strahlung der Sonne hängt von vielen Faktoren ab. Zum einen hängt sie von der Neigung der Fläche gegen die Horizontale mit dem Winkel β und zum anderen davon, wie weit die Fläche aus der Südrichtung um den Winkel α gedreht ist, ab (siehe Abbildung 2-4). Außerdem ist die Position der Sonne, welche durch den Stundenwinkel ω und dem Deklinationswinkel δ bestimmt wird, ein maßgebender Faktor.

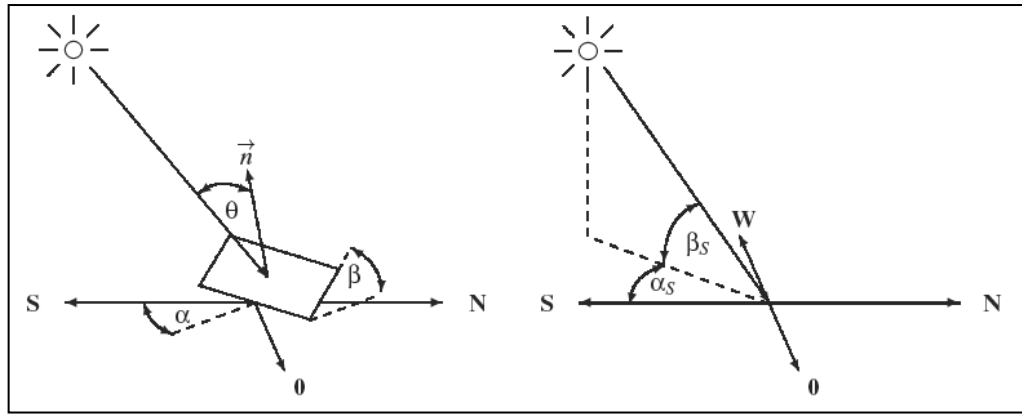


Abbildung 2-4: Definition der Winkel

(Wesselak & Schabbach, 2009)

Um nun die Strahlung von einer beliebig orientierten Fläche auf eine andere orientierte Fläche zu berechnen, muss man zunächst den Einfallswinkel θ der Globalstrahlung auf die beliebig orientierte Fläche bestimmen. Hierzu wird vorab der **Deklinationswinkel δ** berechnet. Dieser beschreibt näherungsweise den Winkel zwischen Sonne und Äquator (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$\delta = -23,45 \cos \frac{2\pi}{365} (n+10) \quad (2.1)$$

n beschreibt hier die Nummer des betreffenden Tages.

Des Weiteren berechnet man den **Stundenwinkel ω** , der pro Stunde 15° beträgt (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$\omega = \frac{15^\circ}{h} (t_s - 12h) \quad (2.2)$$

t_s stellt die betreffende Sonnenzeit dar. Man erkennt, dass die Sonne exakt um 12 Uhr ihren Höchststand erreicht.

Die angegebene Zeit an einem bestimmten Ort weicht immer ein wenig von der Sonnenzeit ab. Hierfür gibt es unterschiedliche Ursachen, wie zum Beispiel, dass die Zeitzonen auf einen Bezugsmeridian festgelegt sind und jede Abweichung um einen Längengrad die Zeit um ca. vier Minuten ändert. Außerdem ist die Zeit auch stark von der Bahngeschwindigkeit der Erde und deren Achsneigung abhängig. Somit muss die gemessene Zeit korrigiert werden. Dies geschieht durch die folgende **Zeitgleichung** (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$ZGL = -7,66 \text{ min} \cdot \sin x - 9,87 \text{ min} \cdot \sin(2x + 24,99^\circ + 3,83^\circ \cdot \sin x) \quad (2.3)$$

$$\text{mit } x = 0,9856^\circ \cdot n - 2,72 \quad (2.4)$$

$$t_s = t - 4(\lambda_0 - \lambda) \frac{\text{min}}{^\circ} + ZGL \quad (2.5)$$

λ_0 ist der Bezugsmeridian der geltenden Zeitzone und λ der Längengrad des Ortes.

Der **Sonnenhöhenwinkel** β_s gibt den Winkel zwischen der Horizontalen am zu bestimmenden Standort und der Geraden vom Standort zur Sonne an. Hierzu wird unter anderem der Breitengrad ϕ des Standortes genutzt (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$\beta_s = \arcsin(\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega) \quad (2.6)$$

Der **Sonnenazimutwinkel** α_s beschreibt den Horizontalwinkel des Sonnenstandes, also wie weit der Sonnenstand von der genauen Südrichtung abweicht (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$\alpha_s = C_1 \arctan\left(\frac{\sin\omega}{\sin\phi \cos\omega - \cos\phi \tan\delta}\right) + C_2(1 - C_1 C_3)90^\circ \quad (2.7)$$

$$\text{mit } C_1 = \begin{cases} 1 & \text{für } \phi \cdot (\phi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{sonst.} \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} 1 & \text{für } \omega \geq 0 \\ -1 & \text{sonst.} \end{cases}$$

$$C_3 = \begin{cases} 1 & \text{für } |\omega| < \arccos\left(\frac{\tan\delta}{\tan\phi}\right) \\ -1 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Durch diese berechneten Werte ist es nun möglich zu jedem Zeitpunkt den **Einfallswinkel** θ der direkten Globalstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche mit der Ausrichtung α , β zu berechnen (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$\begin{aligned} \cos\theta(\alpha, \beta) = & (\cos\beta \sin\phi - \sin\beta \cos\phi \cos\alpha) \sin\delta + \\ & (\cos\beta \cos\phi + \sin\beta \sin\phi \sin\alpha) \cos\delta \cos\omega + \\ & \sin\alpha \sin\beta \cos\delta \sin\omega \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\cos\theta(\alpha, \beta) = \cos\beta \sin\beta_s + \sin\beta \cos\beta_s \cos(\alpha_s - \alpha) \quad (2.9)$$

Die gemessene direkte Sonnenstrahlung I_m mit der Ausrichtung α_m , β_m lässt sich jetzt mittels der Gleichung (2.8) zur direkten **Sonnenstrahlung** I auf die Horizontale, also mit der Ausrichtung $\alpha=0^\circ$ und $\beta=0^\circ$, umrechnen (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$I(\alpha, \beta) = I_m \frac{\cos\theta(\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ)}{\cos\theta(\alpha_m, \beta_m)} \quad (2.10)$$

Somit erhält man die direkte Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche zu einem bestimmten Zeitpunkt. Möchte man allerdings die **Tagessumme** I_d der Strahlung ermitteln, muss über den Tag vom Sonnenaufgang bis zum Sonnenuntergang integriert werden (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$I_d(\alpha, \beta) = I_{dm} \frac{\int_{\omega_a}^{\omega_u} \cos\theta(\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ) d\omega}{\int_{\omega_a^*}^{\omega_u^*} \cos\theta(\alpha_m, \beta_m) d\omega} \quad (2.11)$$

Wie schon erwähnt sind die Integrationsgrenzen ω_a , ω_u , ω_a^* und ω_u^* die Stundenwinkel zur Zeit des Sonnenauf- und -untergangs. Hierbei sind ω_a und ω_u die Stundenwinkel bezogen auf die horizontale Fläche. Für diese gilt (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$\omega_u = \arccos(-\tan\delta \tan\phi) \quad \text{und} \quad \omega_a = -\omega_u \quad (2.12)$$

ω_a^* und ω_u^* sind die Stundenwinkel bezogen auf eine horizontale Fläche, wobei man davon ausgeht, dass die Fläche Richtung Süden geneigt ist. Somit gilt für diese (Wesselak & Schabbach, 2009):

$$\omega_u^* = \min(\omega_u, \arccos(-\tan(\phi-\beta)\tan\delta)) \quad \text{und} \quad \omega_a^* = -\omega_u^* \quad (2.13)$$

2.2. Photovoltaik

„Photovoltaik bezeichnet die Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie mittels Solarzellen“ (Wesselak & Schabbach, 2009, S.121).

Sie geht zurück auf den Physiker Alexandre Becquerel, welcher im Jahr 1839 den äußeren Photoeffekt entdeckte. Jedoch wurde der innere Photoeffekt, welcher für die Photovoltaik von Bedeutung ist, erst 1873 vom britischen Ingenieur Willoughby Smith beobachtet. Dieser berichtete zum ersten Mal von einer Veränderung des elektrischen Widerstands von Selen durch Beleuchtung. Daraufhin wurde von Charles Fritts im Jahre 1883 der erste funktionsfähige Solargenerator, mit einer Größe von 30 cm² und einem Wirkungsgrad von 1%, entwickelt. Im Jahr 1907 fertigte Albert Einstein seine Lichtquantenhypothese und lieferte somit die erste Erklärung für den Photoeffekt.

Im weiteren Verlauf wurden viele neue Entwicklungen erforscht und führten 1954 zur ersten Silizium-Solarzelle mit p- n- Übergang, welche einen Wirkungsgrad von 4 - 6% erreichten. Vier Jahre später wurden zum ersten Mal Solarzellen in Satelliten verwendet. Bis in die 90er Jahre hinein stand der Wirkungsgrad der Solarzellen im Vordergrund, dieser sollte so hoch wie möglich sein. Heute jedoch konzentriert man sich darauf an Material für die Solarzellen zu sparen, sodass sich die hohen Anschaffungskosten reduzieren. Hierzu werden dünneres Halbleitermaterial sowie unreineres Silizium verwendet.

Wie schon erwähnt, ist ein Nachteil der Photovoltaik die hohen Anschaffungskosten, wobei die Betriebskosten allerdings gering sind. Außerdem besitzt die Solarstrahlung eine relativ geringe Energiedichte. Jedoch kann durch Photovoltaik Strahlungsenergie in so gut wie jede andere Energieform umgewandelt werden. Auch die lange Lebensdauer sowie die universelle Einsetzbarkeit sind Vorteile der Photovoltaikanlagen (Wesselak & Schabbach, 2009).

2.2.1. Physikalische Grundlagen bzw. -begriffe

Bei der Photovoltaik spielen die Materialien aus denen die Solarzellen angefertigt werden eine große Rolle. Hierzu wird zwischen drei Materialien unterschieden:

Nichtleiter: Ihre Elektronenhülle ist voll aufgefüllt mit Elektronen und hat dadurch keine frei beweglichen Elektronen mehr. Dies ist der Grund, warum sie nichtleitend sind. Beispiele hierfür sind Gummi und Keramik. Es könnte höchstens durch sehr hohe Temperaturen dazu kommen, dass vereinzelt ein paar Elektronen anfangen sich zu bewegen, zum Beispiel kommt dies bei Keramik vor (Watter, 2011).

Leitenden Materialien: Sie besitzen im Gegensatz zu Nichtleiter freie Elektronenbindungen und sind dadurch leitfähig. Zum Beispiel gehören hierzu Metalle und Legierungen (Watter, 2011).

Halbleiter: Zu den Halbleitern gehören zum Beispiel Silicium, Germanium und Gallium-Arsenid. Diese chemisch reinen Halbleiter sind im Prinzip bei niedrigen Temperaturen Nichtleiter und werden erst durch Zufügen von thermischer Energie zu leitenden Materialien. Durch die Wärmezufuhr werden Elektronen aus ihren Bindungen gelöst und das Material wird leitfähig (Watter, 2011).

Um die Leitfähigkeit der Halbleiter zu erhöhen, werden Fremdatome, sogenannte Störstellen, in das Kristallgitter des Halbleiters hinzugefügt. Diesen Vorgang nennt man Dotierung. Es sind jedoch nur Fremdatome wirksam, welche eine andere Valenzelektronenzahl als die des Halbleiters aufweisen. Es wird zwischen zwei Dotierungsformen bei der Photovoltaik unterschieden (Wesselak & Schabbach, 2009)(Watter, 2011):

n- Dotierung: Bei der n- Dotierung werden Fremdatome genutzt die eine höhere Valenzelektronenzahl haben als die des Halbleiters. Zum Beispiel wird vierwertiges Silizium durch fünfwertiges Arsen oder Phosphor dotiert. Das übrige Elektron ist nur schwach an das Gitternetz gebunden und erhöht somit als frei bewegliches Elektron die Leitfähigkeit des Siliziums. Durch den Überschuss an negativen Elektronen wird dieser Vorgang n- Dotierung genannt (Wesselak & Schabbach, 2009)(Watter, 2011).

p- Dotierung: Wird ein Halbleiter mit einem Fremdatom, welches weniger Valenzelektronen hat, verunreinigt, wie zum Beispiel Silizium mit dreiwertigem Bor oder Aluminium, nennt man dies p- dotiertes Kristallgitter, da die positive Kernladungszahl überwiegt. Dieses Fremdatom ist in der Lage ein zusätzliches Elektron aus dem Kristallgitter aufzunehmen und wird deshalb auch Akzeptor genannt. Durch diesen Vorgang wird die Zahl der freien beweglichen Ladungsträger erhöht, wodurch die Leitfähigkeit zunimmt (Watter, 2011).

Diese zwei Arten der Dotierung werden in der folgenden Abbildung nochmals verdeutlicht:

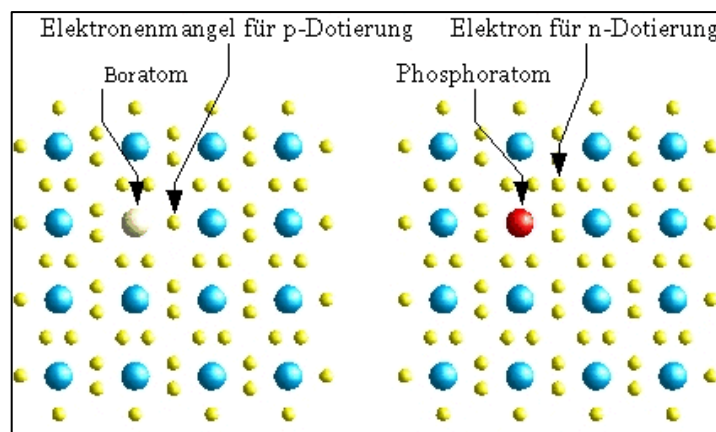


Abbildung 2-5: Darstellung einer p- und n- Dotierung von Silizium
(<http://www.thur.de/philo/bilder/nano/dotierung.gif> , 11.04.2012)

2.2.2. Funktionsprinzip von Solarzellen

Beim Anfertigen der Solarzellen werden dünne Schichten von n- dotierten Kristallgittern und von p- dotierten Kristallgittern übereinander angebracht. Hierdurch entsteht am n- p- Übergang eine Verarmung an Elektronen und an Löcher, denn die Löcher diffundieren aus dem p- dotierten Kristallgitter in das n- Dotierte und die Elektronen umgekehrt auf Grund des Konzentrationsunterschiedes. Durch diesen Austausch entsteht im Übergangsgebiet ein

Mangel an Löcher und Elektronen, wodurch ein elektrisches Feld, die Raumladungszone, aufgebaut wird.

Wenn nun ein Photon auf die Solarzelle trifft, wird seine Energie in der Raumladungszone absorbiert und das Photon wird in ein Loch und ein Elektron geteilt, wodurch es wieder zum Gleichgewicht kommt. Daraufhin geht das Elektron in das n- dotierte Kristallgitter und das Loch in das p- dotierte Kristallgitter über. Hierdurch entsteht in den Kristallgittern jeweils ein Überschuss an Elektronen und an Löcher und es kommt zur elektrischen Spannung. Diese beträgt ungefähr 0,5 bis 0,6 V pro Zelle (Watter, 2011).

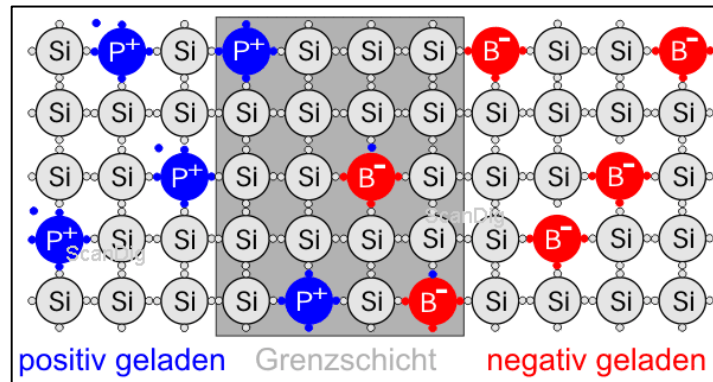


Abbildung 2-6: Funktionsprinzip einer Solarzelle

(http://www.filmscanner.info/Bilder/CCD_02.gif , 11.04.2012)

2.2.3. Wirkungsgrad

Heutzutage liegt der Wirkungsgrad von Solarzellen im tatsächlichen Gebrauch bei 10 bis 19 %. Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, muss das Kristall höchste Reinheit haben und darf nur wenige bis keine Gitterfehler aufweisen. Der tatsächlich erbrachte Ertrag hängt auch von äußeren Faktoren, wie der Stellung der Sonne oder des Wetters ab. Zum Beispiel fällt die Leistung um 75 bis 95% bei bewölktem Himmel.

Außerdem kommt es zu Verlusten beim Betrieb von Solarzellenanlagen, die den Wirkungsgrad minimieren können. Das verdeutlicht die folgende Abbildung (Watter, 2011).

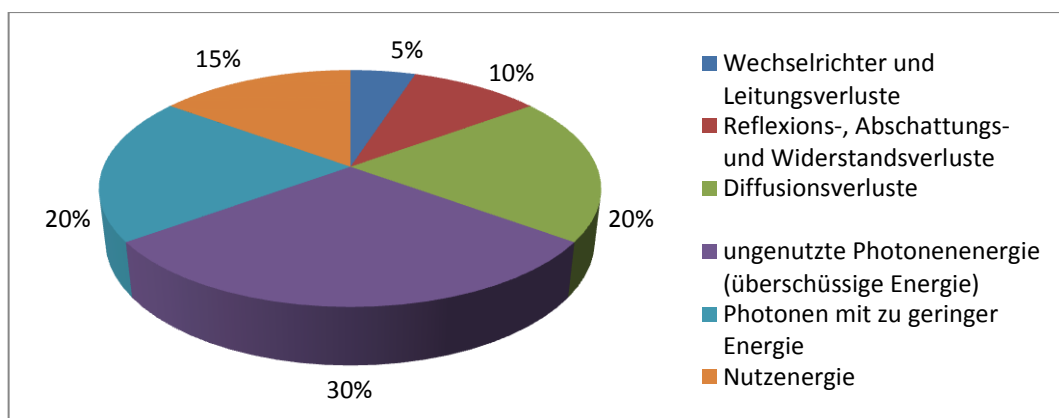


Abbildung 2-7: Typische Verluste und Wirkungsgradanteile von Solarzellenanlagen

(Watter, 2011)

Außerdem ist zu beachten, dass sich die Wirkungsgrade auf Standardtestbedingungen beziehen, welche im praktischen Einsatz unrealistisch sind. Bei den Labortest wird unter anderem eine Zelltemperatur von 25 °C, eine Einstrahlung von 1000 W/m² sowie eine Spektralverteilung des Lichts, die nur erreichbar ist wenn der Sonnenstand sehr hoch ist, vorausgesetzt. Somit muss man mit einem niedrigeren Wirkungsgrad im tatsächlichen Einsatz rechnen (Watter, 2011). Dies wird anhand der anschließenden Abbildung 2-8, durch den Vergleich zwischen Laborwerten und Produktionswerten, verdeutlicht.

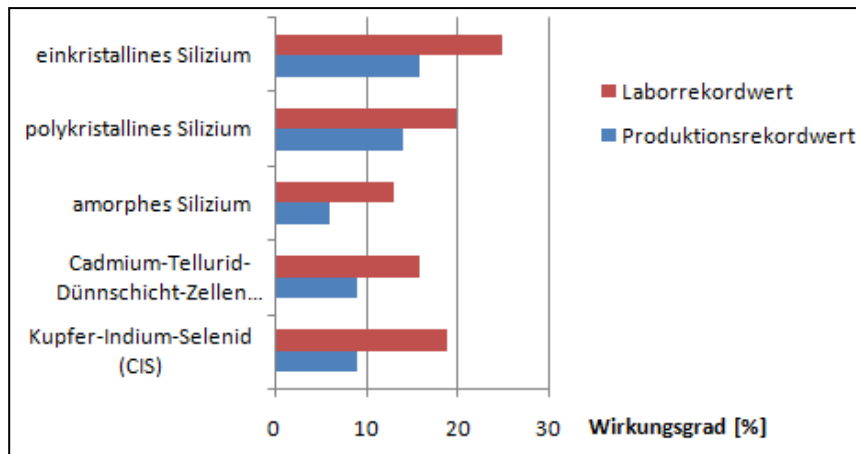


Abbildung 2-8: Wirkungsgradbereiche verschiedener Zelltypen

(Watter, 2011)

2.2.4. Photovoltaik- Inselssysteme

Photovoltaikanlagen, welche nicht an ein elektrisches Versorgungsnetz angeschlossen sind, nennt man Photovoltaik- Inselanlagen. Diese besitzen Energiespeicher, welche die Energienachfrage- und das Energieangebot regeln.

Es gibt zwei Arten von Inselsystemen: Zum einen die mobilen Systeme, wie solarbetriebene Uhren und Taschenrechner, und zum anderen die stationären Inselssysteme. Sie werden für die Versorgung von netzfernen Verbrauchern, wie zum Beispiel Wohngebäude- und Trinkwasserpumpen, genutzt.

Die Photovoltaik- Inselssysteme weisen häufig eine Überdimensionierung in den einstrahlungsstärkeren Monaten auf. Dazu kommt es, da das System nach dem Monat mit dem geringsten Strahlungsangebot bzw. der geringsten Strahlungsintensität ausgelegt wird. Vor allem werden die Ausrichtung der Module und die Größe der Generatorfläche danach orientiert.

Die Energiespeicher bzw. Akkumulatoren werden danach ausgelegt, dass sie den Energiebedarf des Verbrauchers im geladen Zustand 3 bis 6 Tage abdecken können (Wesselak & Schabbach, 2009).

2.3. Wasserentsalzungsverfahren

Die Wasserentsalzungsverfahren lassen sich in zwei Arten unterteilen: Zum einen das Verfahren ohne und zum anderen das Verfahren mit Phasenwechsel. Die Verfahren ohne Phasenwechsel nutzen zur Entsalzung die Selektivität von Membranen, wohingegen die Verfahren mit Phasenwechsel die Verdampfung und die Kondensation zur Trennung von

Salzungen nutzen. Hierzu gibt es unterschiedliche Technologien, die in der folgenden Abbildung dargestellt sind.

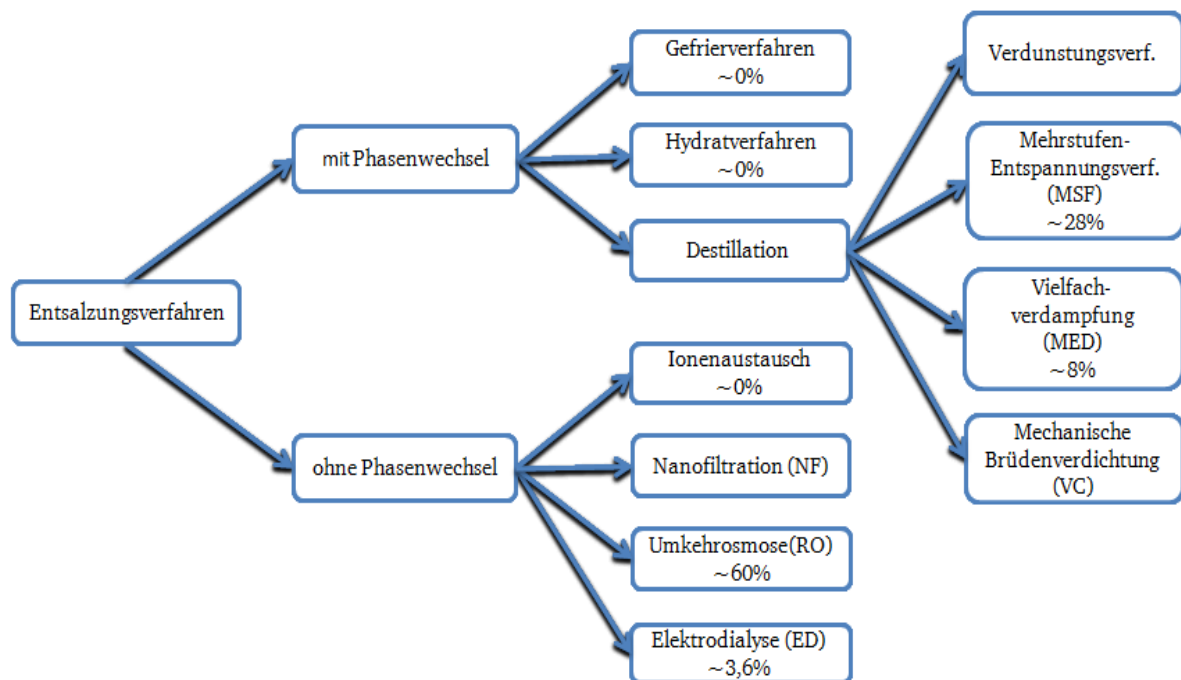


Abbildung 2-9: Entsalzungsverfahren

(Koschikowski Dr., 2011a)

Das Ionenaustauschverfahren sowie das Gefrier- und Hydratverfahren werden, wie in der Abbildung erkennbar, nicht allzu oft genutzt und spielen bei der Entsalzung nur eine untergeordnete Rolle. Deshalb wird im weiteren Verlauf nicht genauer auf sie eingegangen (Brendel, 2003).

Zum besseren Verständnis werden zunächst einige grundlegende Begriffe erläutert. Das salzhaltige Wasser, welches dem Kondensator oder dem Verdampfer der Entsalzungsanlage zugeführt wird, nennt man Speisewasser oder Feed. Bei thermisch getriebenen Anlagen, also bei Anlagen mit Phasenwechsel, nennt man das gewonnene reine Produktwasser Destillat. Bei Membranverfahren nennt man es hingegen Permeat, da es durch die Membran permeiert ist. Das konzentrierte Salzwasser, welches nicht in Produktwasser umgebildet wurde und aus der Entsalzungsanlage abgeführt wird, nennt man Konzentrat oder Brine. Bei Membranverfahren wird der Teil, der an der Membran vorbeiströmt, Retentat genannt (Koschikowski, 2011b).

2.3.1. Umkehrosmose (RO)

Bei der Umkehrosmose (Reverse Osmosis) werden Salzionen durch eine semipermeable Membran von reinem Wasser getrennt. Durch den Konzentrationsunterschied entsteht ein osmotischer Druck. Diesem Phänomen wird jedoch durch eine Druckerhöhung, über den osmotischen Druck hinaus, in der Kammer des Speisewassers entgegengewirkt. Hierdurch wird der Prozess der Osmose umgekehrt. Es werden Wassermoleküle durch die Membran in die Kammer mit dem reinen Wasser gedrückt, wobei der größte Teil der Salzmoleküle nicht hindurch gelassen wird.

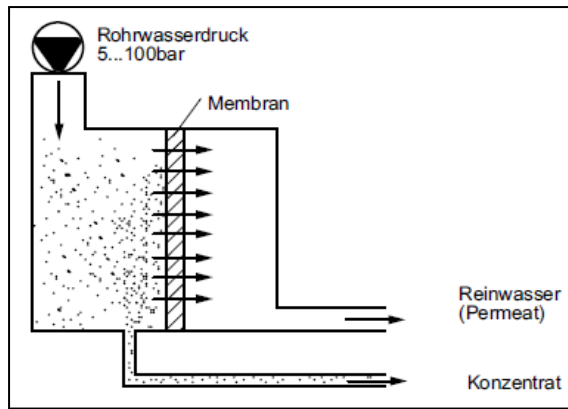


Abbildung 2-10: Prinzip der Umkehrosmose
(Mutschmann & Stimmelmayer, 2007)

Die Nachfrage nach diesem Verfahren erhöhte sich in den letzten Jahren immer mehr. Es wird vor allem bei der Entsalzung genutzt, wenn die Speisewässer einen geringen Salzgehalt haben oder wenn das Produktwasser einen erhöhten Restsalzgehalt aufweisen darf (Brendel, 2003). Jedoch entstehen durch die Nutzung der Membran auch Probleme. Zum Beispiel kann die Membrane durch Kristallisation (Scaling) oder durch Verschmutzung (Fouling) verblockt werden (Rautenbach, 2007).

2.3.2. Nanofiltration (NF)

Die Nanofiltration verläuft ähnlich wie die Umkehrosmose. Auch dieses Verfahren ist ein durch Druck betriebenes Membranverfahren. Jedoch liegt der Wert für den aufzubringenden Druck mit 3 bis 30 bar unter den Werten, die für die Umkehrosmose benötigt werden. Deshalb wird dieses Verfahren auch als „low pressure reverse osmosis“ oder als „loose reverse osmosis“ bezeichnet.

Ein negativer Faktor bei diesem Verfahren ist das Zurückhaltevermögen von organischen Komponenten. Während die Umkehrosmose bereits Komponenten mit einer Molmasse von 150 kg/kmol fast gänzlich aufhält, hält die Nanofiltration erst organische Komponenten ab einer Molmasse von 200 kg/kmol zurück. Ein Vorteil, zugleich auch eine Besonderheit der Membranen für die Nanofiltration, ist ihre Ionenselektivität. Salze mit höher wertigen Anionen werden größtenteils durch die Membran zurück gehalten. Im Gegensatz dazu können Salze mit einwertigen Anionen fast ausschließlich durch die Membran diffundieren. Dies lässt erkennen, wie die Wertigkeit eines Anions erheblich die Permeabilität eines Salzes beeinflusst. Der Rückhalt bei den Anionen NO_3^- , Cl^- , OH^- , SO_4^{2-} sowie bei CO_3^{2-} steigt in dieser Reihenfolge zunehmend an, genauso wie bei den Kationen H^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} und Cu^{2+} (Rautenbach, 2007).

2.3.3. Elektrodialyse (ED)

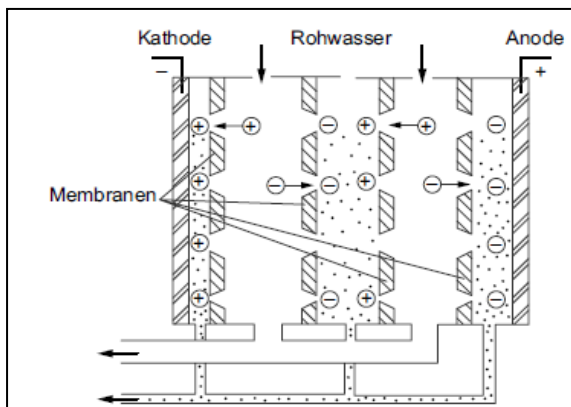


Abbildung 2-11: Prinzip der Elektrodialyse
(Mutschmann & Stimmelmayer, 2007)

Anlagen, die nach dem Verfahren der Elektrodialyse arbeiten, bestehen aus vielen Kammern, welche durch Membranen getrennt werden und ständig mit neuem Speisewasser beliefert werden. Die Membranen sind abwechselnd als Anionenaustauschermembran (AAM) und als Kationenaustauschermembran (KAM) angeordnet. Kationenaustauschermembranen sind permeabel für Kationen, wohingegen Anionen zurückgehalten werden.

Bei Anionenaustauschermembranen ist dies analog dazu.

Wenn nun elektrische Gleichspannung durch außen befindliche Elektroden angelegt wird, fließen die Anionen Richtung Anode und die Kationen Richtung Kathode. So kommt es dazu, dass sich in jeder zweiten Kammer die Ionen konzentrieren und in den anderen Kammern eine Verarmung der Ionen stattfindet. In der Hälfte der Kammern befindet sich nun reines entsalztes Wasser, welches ablaufen kann (Rautenbach, 2007)(Mutschmann & Stimmelmayer, 2007).

2.3.4. Destillation

Zu den Destillationsverfahren gehören unter anderem das Verdunstungsverfahren, die Mechanische Brüdenverdichtung, die Mehrstufen- Entspannungsverdampfung sowie die Vielfachverdampfung. Zu den letzteren zählen auch die zwei Anlagen in Akutsima, von denen eine mit Multi Stage Desalination und die andere mit Multi Effect- Humidification arbeitet.

Auf das Verdunstungsverfahren wird im Weiteren nicht genauer eingegangen, da dies nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Bei der Mehrstufen- Entspannungsverdampfungsanlage wird zunächst das vorbehandelte Speisewasser auf eine Maximaltemperatur von 90 bis 135 °C erhitzt. Danach fließt es in die erste Verdampferkammer, wo ein Teil verdampft. Von dort aus fließt das konzentriertere Salzwasser in die zweite Verdampferkammer, in der wiederum ein Teil verdampft. Dieser Vorgang wiederholt sich in der Regel zwischen 20- und 40-mal, wobei in jeder Stufe die Temperatur und der Druck abnehmen. Dadurch kann in jeder Kammer eine Entspannungsverdampfung, auch Flash genannt, stattfinden. In der oberen Hälfte jeder Kammer wird der Wasserdampf kondensiert und als Destillat entnommen (Brendel, 2003).

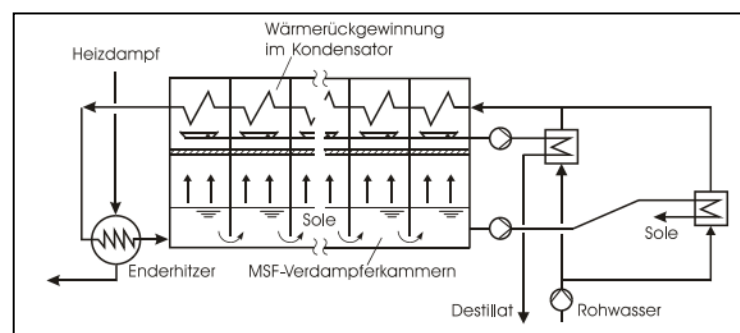


Abbildung 2-12: Fließbild einer konventionellen Mehrstufen-Entspannungsverdampfungsanlage (MSF)

(Brendel, 2003)

Beim Vielfachverdampfungsverfahren wird das Speisewasser auch stufenweise aufgewärmt bevor es der heißesten Verdampferstufe zugeführt wird. Bei der ersten Stufe rieselt das Speisewasser von außen auf die Verdampferrohre, in welchen sich Heizdampf befindet, sodass das Rohwasser zum Teil verdampft. Dieser Dampf wird durch die in der zweiten Stufe befindlichen Verdampferrohre und dem Rohwasservorwärmer geführt und kondensiert dort. Die Verdampferrohre der zweiten Stufe werden wiederum mit dem konzentrierteren Salzwasser der ersten Stufe berieselt. Da dort ein niedrigerer Druck herrscht und die Verdampferrohre Wärme abgeben, verdampft wieder ein Teil des salzigen Wassers. Dieser Vorgang wiederholt sich zwischen 8- und 16-mal, bis der höchste Salzgehalt, der niedrigste Druck und die niedrigste Temperatur erreicht wurden.

Diese Anlagen haben eine höhere Effizienz als die MSF- Anlagen, jedoch gibt es immer wieder Probleme mit der Verkrustung der Heizflächen (Brendel, 2003).

Das Verfahren mit der Brüdenverdichtung basiert darauf, dass durch einen Verdampfer Dampf erzeugt wird, welcher mit Hilfe eines Verdichters das Druck- und Temperaturniveau erhöht. Dieser Dampf wird dem selben Verdampfer auf der Seite, auf der das höhere Temperaturniveau liegt, zugeführt, wodurch der Dampf kondensiert und er seine Wärme über eine Übertragungsfläche an die Seite mit dem geringeren Temperaturniveau abgibt. Hierdurch bildet sich erneut Dampf. Dieses Verfahren erzielt einen hohen Energie- Rückgewinnungsgrad und es muss keine Energie, wie bei den MSF- und MED- Verfahren, abgeführt werden, um die Temperatur- und Druckdifferenz aufrecht zu halten.

2.3.5. Membrandestillation

Die Membrandestillation ist ein thermisches Verfahren und zählt zu den Verfahren mit Phasenwechsel. Hierbei wird das Salz vom Wasser durch eine mikroporöse Membran, welche aus einem hydrophoben Kunststoff gefertigt ist, getrennt. Die Membran ist sehr gut wasserdampfdurchlässig, da sie eine hohe Porosität, mit Poren zwischen 0,1 und 0,5 μm Durchmesser, aufweist. Jedoch lässt sie kein flüssiges Wasser hindurch und wird auch von diesem nicht benetzt, weil Wasser Dipoleigenschaften besitzt und die Membran unpolar ist (Koschikowski, 2011b).

Mittlerweile werden vier verschiedene Membrandestillationsverfahren angewendet. Hierzu zählen das Direct Contact MD- Verfahren (DCMD), das Air Gap MD- Verfahren (AGMD), das Sweeping Gas MD- Verfahren (SWGMD) sowie das Vacuum MD- Verfahren (VCMD) (Koschikowski, 2011b).

Beim Direct Contact MD ist die Membran von beiden Seiten mit Flüssigkeit umgeben. Auf der Verdampferseite fließt das heiße Speisewasser und auf der anderen Seite das gekühlte Permeat. Das dampfförmige Permeat kondensiert direkt an der flüssigen Membrangrenzschicht. Bei diesem Verfahren ist nur die Membran als Hindernis zu überwinden, weshalb es zu großen Permeatströmen kommt. Jedoch verliert es an Effizienz, da die Membran einen geringen Wärmewiderstand aufweist und es somit zu einem hohen Wärmeverlust zwischen Verdampfer und Kondensator kommt (Koschikowski, 2011b).

Bei dem Air Gap MD liegt zwischen dem Verdampferkanal mit heißem Speisewasser und dem Kanal mit gekühltem Speisewasser ein Permeatraum, welcher mit Luft gefüllt ist. Das Wasser verdampft im Verdampferkanal und diffundiert durch die Membran in den Permeatraum. Hier kondensiert der Dampf an der Fläche zum gekühlten Speisewasser und fließt dann ab. Dieses Verfahren weist eine höhere Effizienz als das Direct Contact MD- Verfahren auf, da die Luft einen höheren Wärmewiderstand aufweist. Jedoch bietet sie auch einen größeren Widerstand und es kommt nicht zu allzu hohen Permeatströmen wie beim DCMD- Verfahren. Ein weiterer Vorteil ist, dass auch flüchtige Stoffe mit einer geringen Oberflächenspannung durch dieses Verfahren getrennt werden können (Koschikowski, 2011b).

Das Sweeping Gas MD- Verfahren wird auch Airstripping genannt. Hierbei ist es der Fall, dass aus dem Verdampferkanal mit dem heißen Speisewasser, Wasserdampf durch die Membran in einen nebenliegenden Kanal diffundiert. In diesen Kanal wird ein Gas geströmt, welches die Wasserdampfmoleküle mit sich reißt. Diese kondensieren außerhalb der Anlage in einem Kondensator. Bei diesem Verfahren wird der Widerstand, welcher beim Air Gap MD-

Verfahren vorhanden ist, durch das Strömen des Gases reduziert und es werden höhere Permeatströme erzielt (Koschikowski, 2011b).

Beim Vacuum MD wird ein ähnlicher Kanalaufbau wie beim Sweeping Gas MD- Verfahren verwendet. Im Verdampferkanal fließt wieder das warme Speisewasser. Der Wasserdampf diffundiert durch die Membran und wird dann durch einen Unterdruck aus der Anlage abgezogen. Der Dampf kondensiert auch hier mittels eines Kondensators. Ein Vorteil dabei ist, dass die Membran durch den Unterdruck gereinigt wird und somit eine größere Membran zur Verfügung steht, welche die Effektivität erhöht. Auch, dass das Speisewasser hier nicht so hoch erhitzt werden muss, da eine geringe Temperaturdifferenz ausreichend ist, ist von Vorteil. Jedoch müssen diese Anlagen wegen der Erzeugung des Unterdrucks hohen Anforderungen, wie Dichtheit und Stabilität, genügen (Koschikowski, 2011b).

Das Verfahren, welches in der Membrandestillationsanlage in Namibia verwendet wird, ist das Direct Contact MD- Verfahren mit separatem Permeatkanal. Dieses wird auch Permeat Gap MD (PGMD) genannt. Im Folgenden wird das Verfahren anhand einer flachen Kanalanordnung erläutert. Es kann aber auch als ein Schema für andere Modulbauarten verwendet werden.

Beim Permeat Gap MD liegt der Kondensator kanal oberhalb des Verdampferkanals, welche durch einen Kollektor verbunden werden und ansonsten durch eine wasserundurchlässige Folie getrennt sind. Das Speisewasser wird in den Kondensator kanal gepumpt und erhitzt. Im Verdampferkanal verdampft das reine Wasser und diffundiert, auf Grund der temperaturabhängigen Differenz der Partialdampfdrücke zwischen Verdampfer- und Kondensatorfläche, durch die zwischen Kondensator kanal und Verdampferkanal angebrachte Membran in den Destillat kanal. An der Kondensatorfläche kondensiert das reine Wasser, da das Speisewasser im Kondensator kanal kühler ist, und fließt, da die Membran undurchlässig für flüssiges Wasser ist, dort ab. Durch die Kondensation wird Wärme an das zulaufende salzige Wasser abgegeben (Müller, 2009)(Koschikowski, 2011b).

Die folgende Abbildung zeigt ein solches Permeat Gap MD (PGMD):

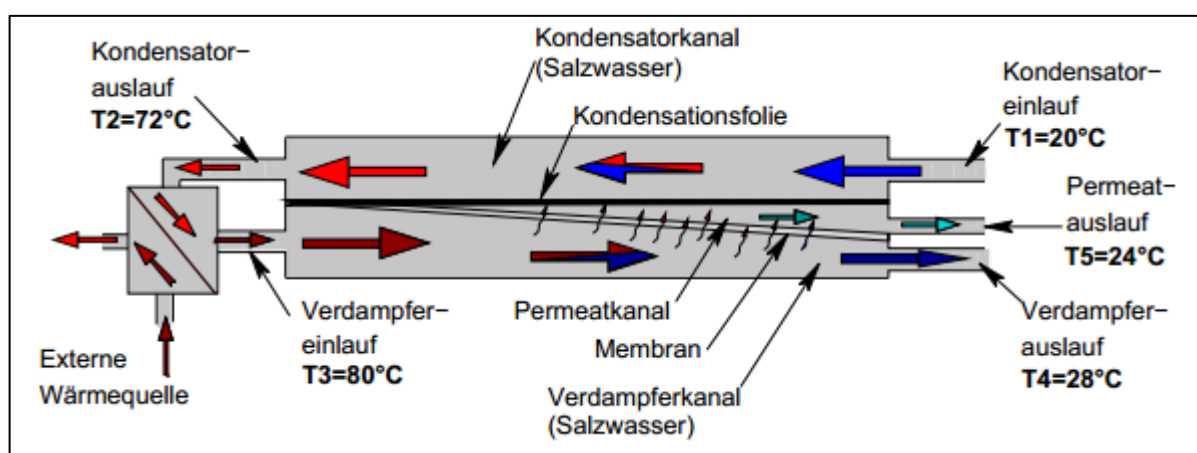


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung eines Permeat Gap MD

(Koschikowski, 2011b)

Ein Vorteil des PGMD- Verfahrens gegenüber dem DCMD- Verfahren liegt darin, dass das Speisewasser direkt zum Kühlen genutzt werden kann und es nur durch eine Wärmequelle

zum Verdampferkanal gelangt. Hierdurch werden Wärmeüberträgerverluste reduziert. Außerdem muss das überschüssige Permeat nicht aus dem Kühlwasser abgezogen werden, da es direkt separat aufgefangen wird. Jedoch fließt das Permeat nur sehr langsam ab und erwärmt sich dadurch schneller. Hierdurch wird die Dampfdruckdifferenz vermindert und es wird weniger Wasserdampf durch die Membran getrieben. Dies hat aber auch den Vorteil, dass die Wärmeleitungsverluste dadurch reduziert werden. Gegenüber dem AGMD-Verfahren wird auch ein erhöhter Permeatstrom erzielt. Besonders hervorzuheben ist noch bei diesem Anlagentyp, dass die Arbeitstemperatur zwischen 60 und 95 °C liegt und der Energiebedarf ca. 24,6 kWh/d beträgt, wodurch die Nutzung von Solarkollektoren ermöglicht wird. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Anlage bei Umgebungsdruck und auch mit hohen Salzkonzentrationen läuft. Allerdings sind die Kosten der Membranen relativ hoch und man benötigt zusätzliche Pumpen. Dagegen weisen diese Verfahren eine gute Qualität des Destillats mit einer elektrischen Leitfähigkeit zwischen 50 und 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf (Müller, 2009) (Factsheet Desalination) (Koschikowski, 2011b).

Des Weiteren wird bei der Membrantechnik zwischen drei Modulbauformen unterschieden. Das Plattenmodul, Hohlfadenmodul und das Spiralwickelmodul. Beim Plattenmodul werden abwechselnd nebeneinander Speisewasserkanäle und Permeatkanäle angeordnet, welche durch Membranen getrennt werden. Das Speisewasser läuft stirnseitig zu und auf der anderen Seite läuft das reine Permeat ab. Bei Hohlfadenmodulen werden Hohlfäden aus Membranmaterial verwendet. Hierbei wird das Speisewasser entweder durch die Fäden gedrückt und das Permeat tritt aus (Inside- Out Betrieb) oder das Speisewasser wird von außen auf die Hohlfäden gedrückt so dass das Permeat durch die Fäden abläuft (Outside- In Betrieb). In Amerika wird das Spiralwickelmodul verwendet. Hierbei werden sogenannte Membrane Envelopes, in welchen sich die sogenannten Permeatspacer, also Kanäle zum Ableiten des Permeats, befinden, um ein Zentralrohr gewickelt. Die Envelopes sind mit dem Zentralrohr verbunden, sodass durch dieses das gesamte Permeat abfließt. Zwischen den Envelopes befindet sich der Feedspacer, durch den das Speisewasser geführt wird (Koschikowski, 2011b). Diese Modulbauform wird in der folgenden Abbildung 2-14 dargestellt.

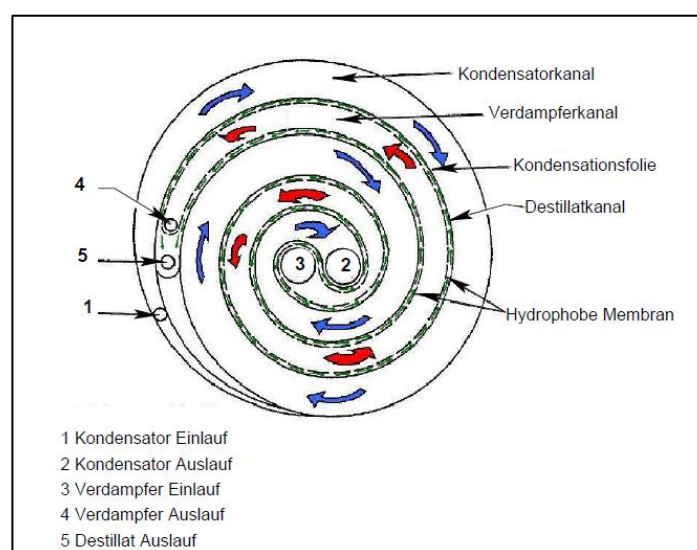


Abbildung 2-14: schematische Darstellung eines Spiralwickels

(Koschikowski, 2011b)

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Anlagenschema der Membrandestillationsanlage in Amarika. Es handelt sich um ein Zweikreissystem, bei dem der Kollektorkreis mit dem Salzwasserkreis über einen salzwasserresistenten Wärmeüberträger zum Beispiel aus Titan verbunden wird. Der Ecosol 2.32 Kollektor ist von der Firma ESE. Zusätzlich wird ein Warmwasserspeicher in das System eingebunden (Koschikowski, 2011b).

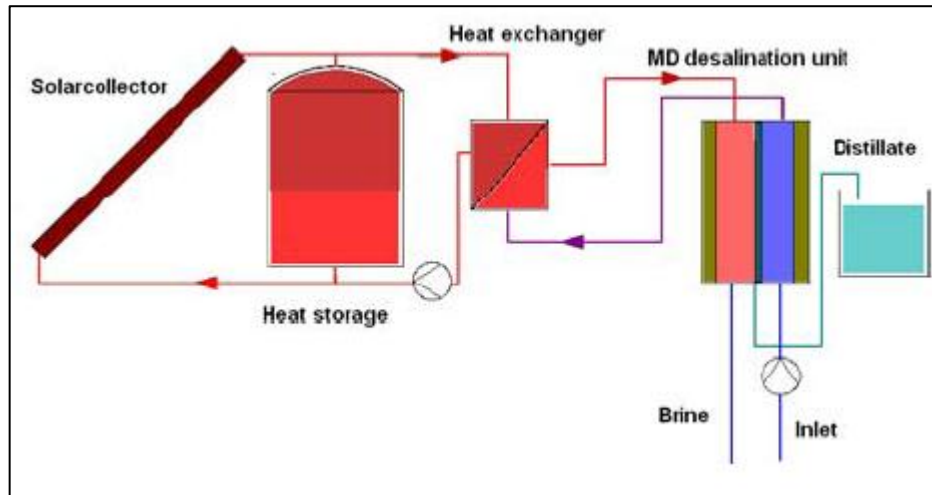


Abbildung 2-15: Schematische Darstellung des Zweikreissystems
(CuveWaters, 2010)

2.4. Thermodynamik

Die Thermodynamik beschreibt den Zusammenhang bzw. die Änderung von komplizierten Systemen durch Wechselwirkungen mit der Umgebung, wie durch Druck oder Temperatur. In den folgenden Abschnitten werden kurz einige Grundlagen der Thermodynamik vorgestellt, sowie weitere wichtige Grundlagen für die Bachelor-Thesis (Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M., 2007).

2.4.1. Wärme

Temperatur ist ein Faktor dafür, wie viel Energie in der thermischen Bewegung von Teilchen vorhanden ist. Bei Gasen und Flüssigkeiten wird diese durch die Rotation und Translation, sowie durch die Schwingungen der Moleküle bestimmt, wohingegen bei Festkörpern die Atome um ihre Ruhelage schwingen. Diese Bewegungen der Moleküle nehmen bei einer Erhöhung der Temperatur zu. Ein Temperatúrausgleich findet dann statt, wenn man zwei Körper unterschiedlicher Temperaturen in Kontakt bringt. Hierbei kühlt der wärmere Körper ab und der Kältere wird erwärmt. Somit wird Energie vom warmen Körper auf den kalten Körper übertragen. Diese Energieübertragung nennt man auch Wärme. Sie wird definiert als die Energie, die wegen eines Temperaturunterschiedes von einem System auf ein anderes übertragen wird und immer in die Richtung der niedrigeren Temperatur fließt, wodurch sie eine eindeutige Richtung aufweist. Die Gesetzmäßigkeit der Fließrichtung vom Kalten ins Warme besagt auch der 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Dieser Prozess kann nicht rückgängig gemacht werden und ist somit irreversibel. Somit ist bei einer Wärmezufuhr immer eine Temperaturerhöhung ohne Volumenänderung zu beobachten, also eine isochore Zustandsänderung. Außer bei einem Phasenwechseln wird keine Temperaturerhöhung festgestellt, hierbei handelt es sich um latente Wärme, die dem System zugeführt wird. Die

Temperaturerhöhung ΔT eines Systems ist immer abhängig von der zugeführten Wärmemenge ΔQ , die proportional zu ΔT ist, und von der Wärmekapazität C des Stoffes.

$$\Delta Q = C \Delta T \quad (2.14)$$

Wenn sich die Wärmekapazität eines Stoffes auf ihre Masse m bezieht erhält man ihre spezifische Wärmekapazität.

$$c_p = \frac{C}{m} \quad (2.15)$$

Somit lässt sich die Formel (2.14) auch umschreiben zu:

$$\Delta Q = c_p m \Delta T \quad (2.16)$$

Die Wärmemenge ΔQ wird in Joule angegeben, die Temperaturdifferenz ΔT in Kelvin und die Masse m in Kilogramm. Die Einheit der spezifischen Wärmekapazität beträgt [J/(kgK)] und ist zum Beispiel bei Wasser von der Temperatur oder vom Salzgehalt des Wassers abhängig. Dies wird anhand der folgenden Tabelle 2-2 verdeutlicht (Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M., 2007) (Baehr, D. & Stephan, K., 2010).

Temperatur [°C]	Dichte ν [l/kg]	spez. Wärmekapazität c_p [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [mW/(mK)]
0	1,000	4,228	561,0
5	1,000	4,200	570,6
10	1,000	4,188	580,0
15	1,0009	4,184	589,4
20	1,0018	4,183	598,4
25	1,0029	4,183	607,2
30	1,0044	4,183	615,5
35	1,006	4,183	623,3
40	1,0079	4,182	630,6
45	1,0099	4,182	637,3
50	1,0121	4,181	643,6
60	1,0171	4,183	654,4
70	1,0227	4,187	663,1
80	1,029	4,194	670,0
90	1,0359	4,204	675,3

Tabelle 2-2: Thermodynamische Eigenschaften von Wasser

(Watter, 2011)

2.4.2. Wärmeübertragung

Über eine Trennwand zwischen zwei Systemen mit unterschiedlichen Temperaturen wird von dem System mit höherer Temperatur zum System mit niedrigerer Temperatur Wärme abgegeben. Der hierdurch beschriebene Wärmedurchgang kann in drei Arten unterschieden werden. In Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung.

Wärmeleitung tritt bei Festkörpern in Form von Schwingungsübertragungen innerhalb des Molekülgitters und in Form von kinetischer Energie der Elektronen bei Stoßprozessen auf. Auch bei stehenden Flüssigkeiten wird die Wärme über Wärmeleitung verbreitet. Die Wärmeleitung ist im Wesentlichen abhängig von der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ des Stoffes. Sie wird in der Einheit [W/(mK)] angegeben und ist für verschiedene Stoffe sehr unterschiedlich (Siehe Abbildung 2-16). Wenn die Dichte der Moleküle, zum Beispiel bei Gasen, sehr niedrig ist, wird die Leitfähigkeit sehr gering. Im Gegensatz dazu, beispielsweise bei Metallen, wird die Wärmeleitfähigkeit sehr hoch, da dort die Wärme über Schwingungen der Elektronen sowie über Stoßprozesse transportiert wird. Die Wärmeleitfähigkeit ist jedoch auch von der Temperatur und von dem Feuchtegehalt des Stoffes abhängig. Faserartige Stoffe, Stoffe mit einem hohen Porenanteil oder luft- und schwergasgeschäumte Stoffe werden, wenn sie eine Wärmeleitfähigkeit unter 0,1 W/(mK) besitzen, Wärmedämmstoffe genannt (Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M., 2007).

Stoff	λ in W/K m	Stoff	λ in W/K m
Silber	427	Wasser	0,598
Kupfer	399	Kohlenwasserstoffe	0,10 ... 0,15
Aluminium 99,2 %	209	CO ₂	0,0162
Eisen	81	Luft	0,0257
Legierte Stähle	13 ... 48	Wasserstoff	0,179
Mauerwerk	0,5 ... 1,3	Krypton	0,0093
Schaumstoffplatten	0,02 ... 0,09	R 123	0,0090

Abbildung 2-16: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe bei 20°C und 100kPa
(Baehr, D. & Stephan, K., 2010)

Mit Hilfe der Wärmeleitfähigkeit λ und der Temperaturdifferenz pro Zeiteinheit ($T_1 - T_2$) lässt sich der Wärmestrom in Watt durch eine Wand mit der Dicke d und mit der Größe der Fläche A berechnen (Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M., 2007):

$$\dot{Q} = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.17)$$

Wird der Wärmestrom über eine gewisse Zeit t integriert erhält man die Wärmemenge in Wattstunde, die durch die Wand in diesem Zeitraum strömt (Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M., 2007):

$$Q = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{d} t \quad (2.18)$$

Durch die Wärmestromdichte in Watt pro Quadratmeter wird die Stärke des Wärmestroms sowie die Richtung dieses angegeben (Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M., 2007):

$$\dot{q} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (2.19)$$

Die **Konvektion** tritt bei Gasen und Flüssigkeiten auf, denn hierbei kommt der Wärmetausch dadurch zustande, dass sich die Systeme relativ zueinander bewegen. Die Konvektion basiert auf der Wärmemitführung und ist an den Transport von Stoffteilchen gebunden. Dieser Typ der Wärmeübertragung wird unterschieden in freie und erzwungene Konvektion. Bei der

freien Konvektion wird der Stoff durch Auftriebskräfte, welche durch Dichteunterschiede oder Temperaturunterschiede zustande kommen und nicht durch äußere Druckkräfte in Bewegung gesetzt, wodurch der Wärmeaustausch stattfindet. Dahingegen werden bei der erzwungenen Konvektion die erwärmten Teilströme durch Zwangskräfte, wie zum Beispiel durch Pumpen, in Bewegung gebracht (Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M., 2007).

Die **Wärmestrahlung** findet vor allem bei Gasen und im Vakuum statt. In diesem Kapitel wird jedoch nicht weiter auf die Wärmestrahlung eingegangen, da dies schon im Kapitel 2.1.1 genauer erläutert wurde.

2.4.3. GOR

Der Gained- Output- Ratio (GOR) wird als Faktor für die Wärmerückgewinnung angegeben. Die Wärmerückgewinnung ist wichtig, da hierdurch der Energieverbrauch einer Anlage reduziert werden kann. Somit gibt der GOR- Wert Aufschluss darüber, wie effizient eine thermisch betriebene Wasserentsalzungsanlage arbeitet. Er definiert das Verhältnis der Verdampfungswärme des produzierten Destillats zur Energie, die die MD- Module aufnehmen.

$$\text{GOR} = \frac{\dot{m}_{Ko} \cdot r_{Ko}}{\dot{Q}_{zu}} \quad (2.20)$$

\dot{m}_{Ko} stellt die Destillatproduktionsrate in [kg/d] dar, r_{Ko} ist die spezifische Verdampfungswärme des Destillates in [kWh/kg] und \dot{Q}_{zu} ist die Wärmemenge, die der Anlage zugeführt wird, in [kWh/d]. Für die spezifische Verdampfungswärme r_{Ko} wird die Verdampfungswärme von Wasser verwendet. Sie beträgt 2257 kJ/kg und umgerechnet auf kWh/kg beträgt sie 0,6267 kWh/kg (Stroppe, H. et al., 2009).

Bei einem GOR von 1 existiert keine Wärmerückgewinnung im System. Hier wird die gesamte Energie, die benötigt wird zur Verdampfung, von außen dem System zugeführt. Hingegen bei einem GOR von 10 wird 9/10 der Wärme dem System wieder zurückgeführt und nur 1/10 der benötigten Wärme wird von außen zugeführt (Koschikowski, 2011b) (TU Clausthal, 2010).

3. Datenauswertung

Für die Datenauswertung wurde der Zeitraum vom 01.05.2011 bis zum 31.07.2011 festgelegt, hierbei handelt es sich um den namibischen Winter. Im Folgenden werden die Messdaten, während des festgelegten Zeitraums, der Globalstrahlung am Standort Amarika und die Daten der Membrandestillationsanlage des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, die Messdaten der Umkehrosmoseanlage der Firma proaqua GmbH sowie die Messdaten der Photovoltaikanlage der Firma juwi Holding AG näher betrachtet.

3.1. Qualität der Daten

Um zu einem aussagekräftigem Ergebnis zukommen, müssen zunächst die Messdaten auf ihre Qualität hin überprüft werden. Dies geschieht durch die Untersuchung auf Vollständigkeit, Korrektheit sowie auf Konsistenz.

3.1.1. Messdaten des Fraunhofer-Instituts

Jeden Tag werden die Daten der Membrandestillationsanlage und die Daten der Globalstrahlung am Standort Amarika gemessen. Hierfür existiert pro Tag eine Datei, in der diese Daten in Intervallen von 10 Sekunden aufgezeichnet werden. Der Betrachtungszeitraum vom 01.Mai 2011 bis zum 31.Juli 2011 umfasst 92 Tage von denen nur ein Datensatz komplett fehlt. Der 18.Juni 2011 fehlt, da an diesem Tag eine Wartung der Anlage durchgeführt wurde. Somit sind die Messdaten für den gewählten Zeitraum relativ vollständig.

Des Weiteren wurden nun die einzelnen Datensätze auf Vollständigkeit überprüft. Hierzu wurde untersucht inwieweit an jedem Tag von 0:00:00 bis 23:59:50 Uhr die 10 Sekunden-Intervalle eingehalten wurden.

Tage, an denen weniger als 10 Minuten fehlen, werden als sehr gut eingestuft (++). Tage, mit fehlenden Werten zwischen 10 Minuten und 30 Minuten, werden noch als gut eingestuft (+). Wenn mehr als 30 Minuten der Daten fehlen, kommt es darauf an zu welcher Uhrzeit sie fehlen. Sind nämlich keine Daten von 23 bis 0 Uhr oder von 0 bis 5 Uhr vorhanden, bringt das fehlen dieser Daten keine bemerkenswerten Auswirkungen mit sich, da zu dieser Uhrzeit voraussichtlich keine Globalstrahlung gemessen werden kann. Somit werden diese Daten mit ausreichend bewertet (-), da sie nicht ganz vollständig jedoch nutzbar sind. Alle anderen Dateien, in denen mehr als die 30 Minuten fehlen und diese sehr relevant für die weiteren Betrachtungen sind, werden als schlecht eingestuft (--).

Man kommt zu dem Ergebnis, dass von den 91 Tagen für 68 Tage ein Datensatz vorhanden ist, also werden 74,72 % der Daten mit sehr gut (++) bezeichnet. 3,30 % sind gut (+), 17,58 % ausreichend (-) und nur 4,40 % werden als schlecht (--) angesehen.

Die 16 Datensätze, die mit ausreichend eingestuft wurden, sind alle an aufeinanderfolgenden Tagen und es fehlen immer die Werte von 23 bis 0 Uhr.

Die vier schlechten Daten, welche auch größten Teils aufeinanderfolgende Tage sind, sind für die Auswertung nicht nutzbar und müssen für die Globalstrahlung ersetzt werden. Hierzu gibt es drei verschiedene Möglichkeiten. Zunächst sollte überprüft werden, ob an den Tagen, an denen keine oder nur wenige Messwerte vorhanden sind, die Globalstrahlung in Akutsima gemessen und aufgezeichnet wurde. Akutsima liegt 50 km von Amarika entfernt, sodass die

Globalstrahlung dort näherungsweise gute Ersatzwerte liefert. Sind die Daten von Akutsima vollständig, sollten die schlechten Daten aus Amarika durch diese ersetzt werden. Jedoch kann es vorkommen, dass auch die Daten aus Akutsima Lücken aufweisen. In diesem Fall sollte ein Mittelwert vom vorherigen und folgenden Tag gebildet werden, der den fehlenden Tageswert ersetzt. Sind die umliegenden Tageswerte auch ungenügend, wird der fehlende Wert durch einen Mittelwert über den gesamten Betrachtungszeitraum ersetzt.

Zu den vier Tagen, an denen die Datensätze Lücken aufweisen, und zum 18. Juni, an dem keine Daten vorhanden sind, liegen Strahlungsdaten von Akutsima vor. Diese ersetzen die Daten von Amarika (siehe Anhang).

In Anhang A findet man die genaue Analyse der einzelnen Tage, an der aufgezeigt wird, welche Tagesdaten vollständig sind und welche durch Werte von Akutsima ersetzt werden mussten.

Alle zu analysierenden Daten waren korrekt. Somit lässt sich zu den Daten über die Globalstrahlung sagen, dass sie qualitativ gut und für die nachfolgenden Analysen nutzbar sind.

3.1.2. Messdaten der Firma juwi

Von der Firma juwi werden nur die Daten über den Batterieladezustand, den Batteriestrom und die Daten über die Temperatur der Batterie auf Vollständigkeit und Korrektheit untersucht. Die Daten wurden in ein Minuten-Intervallen aufgezeichnet. Wenn an einem Tag weniger als 5% der Werte fehlen wurde er mit ein (+) versehen und wenn mehr als 5% fehlen wurde er mit einem (-) markiert.

Der Bewertungszeitraum umfasst den 01.05.2011 bis zum 31.07.2011, jedoch liegen nur die Werte vom 01.05.2011 bis zum 29.06.2011 vor. Allerdings fehlten in diesem Zeitraum keinerlei Werte, womit alle mit einem (+) gekennzeichnet sind. Nur am 29.06.2011 existieren Messwerte bis 18:03 Uhr. Hierzu findet man ebenfalls eine Tabelle im Anhang B, die das Vorgehen näher erläutert.

Auch bei der Untersuchung der Daten auf Korrektheit sind keine Fehler aufgefallen. Somit kommt man zu einem sehr guten Ergebnis. Alle vorhandenen Daten der Firma juwi sind korrekt und vollständig und können für weitere Analysen verwendet werden.

3.1.3. Messdaten der Firma proaqua GmbH

Von den Daten der Umkehrosmoseanlage der Firma proaqua werden nur die Werte des Energieverbrauchs auf Vollständigkeit und Korrektheit hin überprüft, da nur diese für die weiteren Auswertungen von Bedeutung sind. Diese Werte wurden für den täglichen Verbrauch aufgezeichnet.

Tage an denen die Werte des Energieverbrauchs vorhanden sind, werden mit einem (+) versehen und Tage, an denen die Werte fehlen, werden mit einem (-) markiert. Man kommt zu dem Resultat, dass von den 92 Tagen 16 Werte (17,39%) für den Tagesenergieverbrauch fehlen. Die 16 Daten sind an fast aufeinanderfolgenden Tagen. An diesen Tagen wurde die Anlage betrieben, jedoch hat die Datenfernübertragung nicht funktioniert weshalb keine Daten vorliegen.

Die Fehlerrate ist relativ hoch, doch die fehlenden Werte wurden durch den Mittelwert des gesamten Energieverlusts des Betrachtungszeitraums ersetzt. Die Tage an denen der Energieverbrauch durch den Mittelwert ersetzt wurde, sind in Anhang C gelb markiert.

Bei der Untersuchung der Daten auf Korrektheit wurden keine Fehler entdeckt. Somit können die Werte für die nachfolgenden Betrachtungen verwendet werden.

3.2. Globalstrahlung am Standort Amarika

Um die Daten der Globalstrahlung analysieren und auswerten zu können, werden im Folgenden zunächst einige wichtige Informationen zum Standort Amarika und zu den Messbedingungen betrachtet.

Die genauen Koordinaten der Membrandestillationsanlage sowie der Photovoltaikanlage sind S18°21,516' und E15°11,642', somit liegt Amarika auf der Südhalbkugel. Dort steht die Sonne im Norden, weshalb die Solarpanels der Photovoltaikanlage in diese Richtung und mit einer Neigung von 10° ausgerichtet sind. Die Globalstrahlung wird mittels eines Sternpyranometers der Firma ALMENO erfasst. Dieses ist genau wie die Solarpanels Richtung Norden und mit einer Neigung von 10° aufgestellt.

Durch die Intensivität der Globalstrahlung über den Tag lässt sich Erschließen, wie die Witterungsbedingungen zu diesem Zeitpunkt sind. Im namibischen Winter ist der Himmel meistens wolkenlos, jedoch wird im Folgenden ein Beispiel für einen typisch sonnigen Tag im Winter und einen Tag mit unregelmäßiger Globalstrahlung vorgestellt. Für den Tag mit guter Sonneneinstrahlung wird der 26.05.2011 gewählt (siehe Abbildung 3-1). Man erkennt anhand der Abbildung, dass die Globalstrahlung in der Nacht Null ist und dann um ca. 6.30 Uhr, wenn die Sonne aufgeht, anfängt anzusteigen bis die Globalstrahlung zwischen 12 und 13 Uhr ihr Maximum mit ungefähr knapp unter 900 W/m² erreicht. Danach sinkt die Globalstrahlung wieder bis zum Sonnenuntergang um 17.30 Uhr auf Null Watt. Der 01.05.2011 wurde exemplarisch als Tag mit einem höheren Bewölkungsgrad gewählt (siehe Abbildung 3-1). An diesem Tag ist der Sonnenaufgang zwischen 6.00 und 6.30 Uhr. Jedoch erkennt man, dass die Globalstrahlung nicht stetig bis zu Ihrem Maximum am Mittag ansteigt sondern, dass sie sehr stark schwankend verläuft. Um 12.00 Uhr wird das Maximum von über 1.000 W/m² erreicht, jedoch nur für ein paar Sekunden und sinkt dann sofort wieder. Vermutlich war zu diesem Zeitpunkt ein Loch in der Wolkendecke vorhanden. Auch bis zum Sonnenuntergang um 17.30 Uhr schwankt die Globalstrahlung bedeutend. Die niedrigen Messwerte können durch einen bewölkten Himmel, aber auch durch Tiere auf den Messgeräten sowie durch Reinigungsarbeiten dieser, hervorgerufen werden. Wie schon im Kapitel 2.1.3 beschrieben, wird die Globalstrahlung auch dann nicht Null wenn der Himmel vollkommen bedeckt ist, da die Diffusstrahlung nicht vollständig abgehalten wird. Es trifft dann immer noch ca. 10 bis 40 % der Globalstrahlung auf die Erde auf. Dies ist beispielsweise auch am 01.05.2011 um 14.30 Uhr der Fall. Zu diesem Zeitpunkt läge die Globalstrahlung im Vergleich zum 26. Mai ungefähr bei 700 W/m², da der Himmel jedoch vermutlich bedeckt ist, liegt sie nur bei ca. 150 W/m². Somit trifft immer noch annähernd 20% der Globalstrahlung auf die Erde auf.

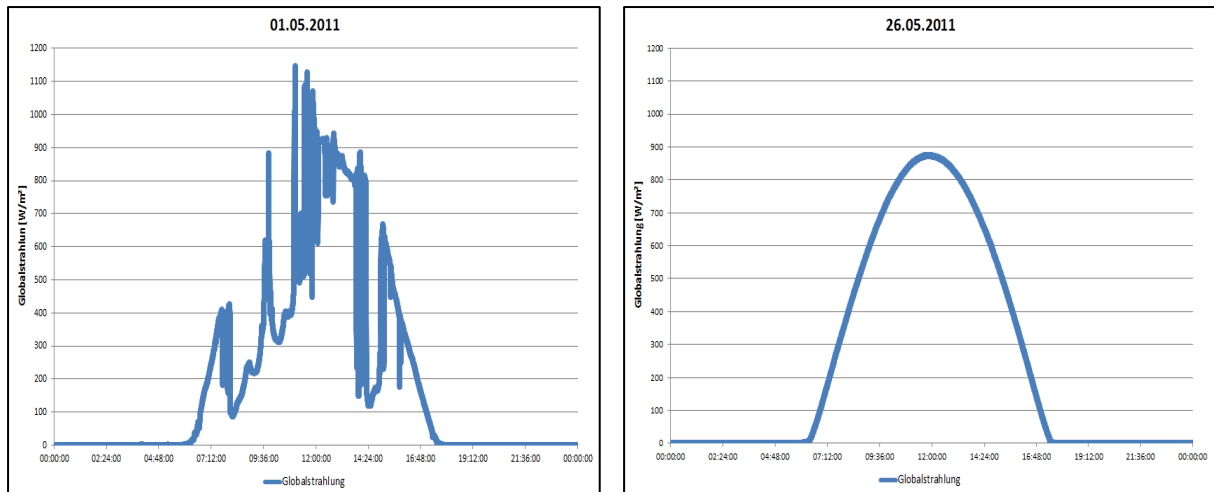


Abbildung 3-1: Globalstrahlung am 01.05.2011 und am 26.05.2011

Die Werte für die Globalstrahlung am Standort Amarika wurden, wie schon oben beschrieben, mittels des Sternpyranometers, welches eine Neigung von 10° aufweist, erfasst. Um nun diese Werte mit Werten aus Globalstrahlungsdatenbanken vergleichen zu können, müssen sie auf die Horizontale umgerechnet werden. Hierzu verwendet man das Umrechnungsverfahren, wie es in Kapitel 2.1.6 beschrieben wurde. Zunächst werden die Zeitgleichung (ZGL) und der Deklinationswinkel, welche pro Tag berechnet werden, bestimmt (Siehe Gleichungen 2.1 und 2.3). Außerdem werden die Stundenwinkel zur Zeit des Sonnenauf- und -untergangs, welche die Integrationsgrenzen darstellen, ermittelt (Gleichungen 2.12 und 2.13). Diese sind abhängig von der Nummer des betreffenden Tages und dem Breitengrad des Standortes. Diese Werte werden im Anhang D dargestellt. Nun kann mithilfe der Zeitgleichung und des Längengrades des Standpunktes die Sonnenzeit berechnet werden (Gleichung 2.5). Mit der Sonnenzeit ist es dann möglich den Stundenwinkel zu bestimmen (Gleichung 2.2). Damit hat man alle Werte bestimmt, die benötigt werden, um den Einfallswinkel, gemessen auf die geneigte Fläche ($\alpha=10^\circ$, $\beta=180^\circ$), und den Einfallswinkel, auf die Horizontale ($\alpha=0^\circ$, $\beta=0^\circ$), zu bestimmen (Gleichung 2.8). Hierzu ist es wichtig zu wissen, dass sich die Gleichungen auf einen Standort auf der Nordhalbkugel bzw. auf eine Ausrichtung der Solarpanels nach Süden beziehen. Deshalb muss bei der Berechnung eine horizontale Drehung um 180° vorgenommen werden. Nun müssen die Werte aus Gleichung 2.8 zwischen Sonnenauf- und -untergang, welche durch den Stundenwinkel bestimmt wurden, integriert werden. Bei der Bestimmung des Sonnenauf- bzw. -untergangs ist es wichtig zu wissen, dass Namibia das einzige Land im Süden Afrikas ist, welches die Winterzeit eingeführt hat. Deshalb befindet sich Namibia in den Wintermonaten in der Zeitzone UTC+1 und in den Sommermonaten in der Zeitzone UTC+2. Die Uhrzeit an den Anlagen in Amarika wird manuell eingestellt, weshalb es dazu kommen kann, dass der berechnete Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergang um eine Stunde von dem tatsächlichen Sonnenauf- bzw. -untergang abweicht. Dies muss bei den beschriebenen Berechnungen gegebenenfalls beachtet und umgerechnet werden. Um nun die Globalstrahlung auf die horizontale Fläche an einem bestimmten Tag zu erhalten, berechnet man das Produkt aus der gemessenen Globalstrahlung auf die geneigte Fläche und dem Quotienten aus den Integralen der Einfallswinkel (Gleichung 2.11). Bei der Umrechnung der Globalstrahlung auf die Horizontale von den Strahlungsdaten aus Akutsima ist zu beachten, dass dort die Strahlungswerte nicht pro Quadratmeter erfasst werden, sondern auf den gesamten thermischen Kollektor. Der Kollektor hat eine Größe von $239,44 \text{ m}^2$. Die berechneten Tageswerte müssen durch die Kollektorgöße dividiert werden, damit man sie

zum Vergleich verwenden kann. Die Tageswerte der Globalstrahlung auf die geneigte Fläche (I_{dm}) sowie die Globalstrahlung auf die horizontale Fläche (I_d) werden in einer Tabelle in Anhang E dargestellt. Außerdem werden in Balkendiagrammen die Tageswerte über mehrere Tage bzw. Monate abgebildet und die Werte zu Monatsmittelwerten zusammengefasst, um den Verlauf besser beurteilen zu können.

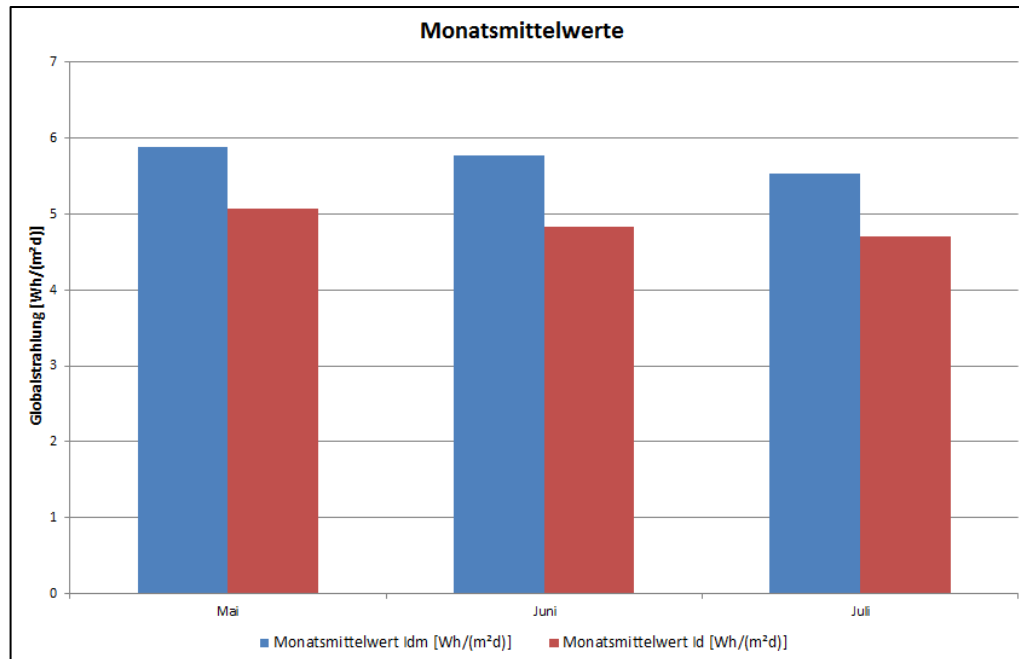


Abbildung 3-2: Mittelwerte der Globalstrahlung auf die geneigte Fläche (I_{dm}) und auf die horizontale Fläche (I_d)

Beim Vergleich der gemessenen Globalstrahlung auf die geneigte Fläche und der berechneten Globalstrahlung auf die horizontale Fläche fällt auf, dass die Werte der geneigten Fläche höher sind und darum mehr Globalstrahlung genutzt werden kann. Die Differenz zwischen der geneigten und der horizontalen Fläche liegt von Mai bis Juli 2011 zwischen 0,54 und 1,00 kWh/(m²d). Zwischen den Monatsmittelwerten der Differenz ist nur ein geringer Unterschied festzustellen. Diese liegen zwischen 0,8 und 0,9 kWh/(m²d). Vermutlich kommen diese durch die unterschiedlichen Witterungsbedingungen und die verschiedenen Laufbahnen der Sonne sowie der Erde im Laufe des Jahres zustande. Die Unterschiede der nutzbaren Globalstrahlung zwischen geneigter und horizontaler Fläche lassen erkennen, dass durch die richtige Ausrichtung der Solarpanels die einfallende Globalstrahlung besser genutzt werden kann.

Zur weiteren Beurteilung der Strahlungswerte werden im Folgenden die gemessene, sowie die berechnete Globalstrahlung am Standort Amarika mit den ermittelten Werten von Strahlungsdatenbanken verglichen.

Wie schon in Kapitel 2.1.5 erwähnt liegt die Globalstrahlung nach SolarGIS zwischen 2200 und 2400 kWh/(m²a) in Namibia. Dies entspricht einer Globalstrahlung von zwischen 6 und 6,6 kWh/m² pro Tag. Jedoch sind dies Werte, die über das gesamte Jahr gemittelt wurden und geben nicht die Schwankungen zwischen den unterschiedlichen Jahreszeiten wieder. Um diesen Unterschied, der schon bei der Betrachtung der ermittelten Monatsmittelwerte erwähnt wurde, zu verdeutlichen, wird auf die Datenbank der NASA zurückgegriffen. Diese erfasst die Daten für bestimmte Standorte auf der Erde seit über 22 Jahren (1983 bis 2005) mit Hilfe von

über 200 Satelliten. Für Amarika ergaben die Messungen auf die horizontale Fläche die folgenden Werte:

Monat	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
I_d [kWh/(m ² d)]	6,95	6,62	6,08	5,58	5,32	4,95	5,02	5,52	6,40	6,90	7,07	7,35

Tabelle 3-1: Monatsmittelwerte der Globalstrahlung am Standort Amarika von der NASA- Datenbank

Diese Werte werden in der folgenden Graphik mit den berechneten Werten am Standort Amarika von Mai bis Juli 2011 zum Vergleich dargestellt.

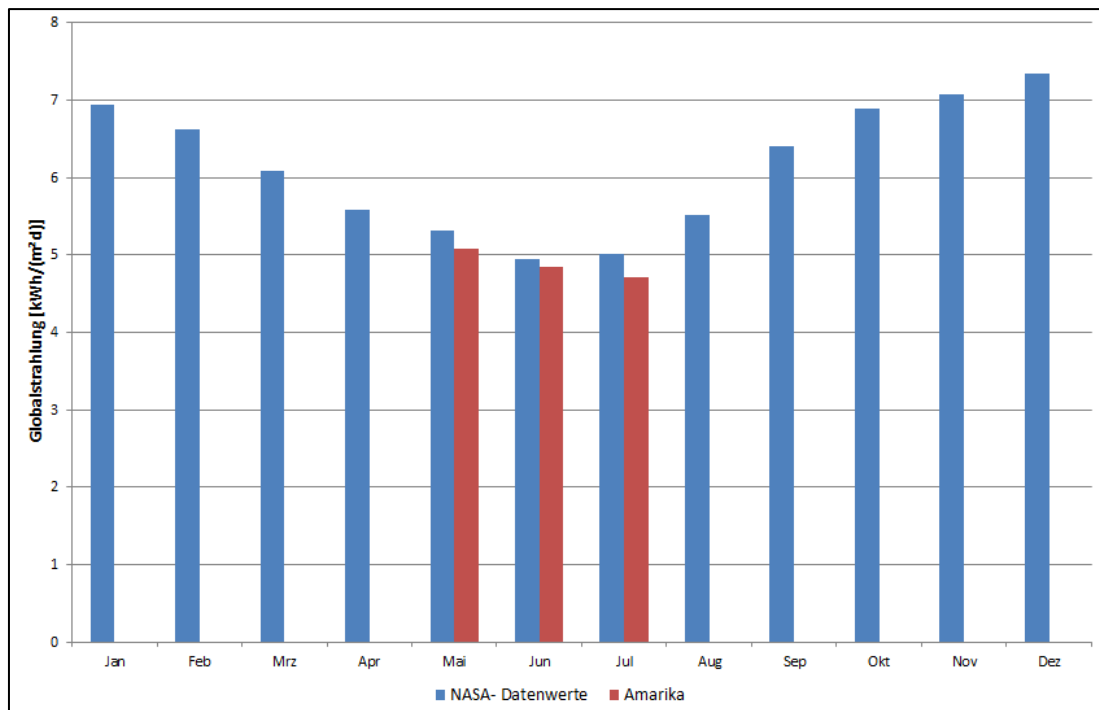


Abbildung 3-3: Vergleich der Monatsmittelwerte der Globalstrahlung auf die Horizontale von der NASA- Datenbank und von Amarika

An den Daten der NASA- Datenbank erkennt man, dass in den Wintermonaten, vor allem im Juni mit dem Minimalwert von 4,95 kWh/(m²d), die Globalstrahlung Werte von um die 5 kWh/(m²d) aufweist. Ab August steigen die Werte bis Dezember, der in Namibia zu den Sommermonaten zählt. Zu dieser Zeit wird ein maximaler Wert der Globalstrahlung von 7,35 kWh/(m²d) gemessen. Ab diesem Zeitpunkt sinken die Strahlungswerte wieder bis zum Juni. Man stellt fest, dass die gemittelte Globalstrahlung im Laufe des Jahres um bis zu 2 kWh/(m²d) schwankt.

Beim Vergleich der Daten der NASA- Datenbank mit den gemessenen und auf die Horizontale umgerechneten Werten für die Globalstrahlung fällt auf, dass die tatsächlich gemessenen Werte unter den Werten der NASA liegen. Sie sind zwischen 0,1 und 0,3 kWh/(m²d) geringer. Jedoch ist der Verlauf der Globalstrahlung über die drei zu betrachtenden Monate anders verteilt. Bei den NASA Daten ist die Strahlungsintensität im Juni am geringsten. Der Juli weist einen etwas höheren Wert auf und der Mai hat den höchsten Einstrahlungswert dieser drei Monate. Bei den gemessenen Werten hat der Juli den geringsten Einstrahlungswert mit 4,7

kWh/(m²d), danach folgt der Juni und dann der Mai mit 5,1 kWh/(m²d). Jedoch entsprechen die Werte, mit einer Abweichung von ca. 4,5 % von den Werten aus der NASA- Datenbank, diesen relativ genau. Demzufolge kann man davon ausgehen, dass die Ergebnisse, die diese Arbeit liefert, die betrachteten 3 Monate repräsentativ darstellen können.

3.3. Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage

Auf den Aufbau der Membrandestillationsanlage wurde schon in Kapitel 2.3.5 eingegangen. Im Folgenden werden daher vorwiegend die Betriebsdaten der Anlage behandelt.

Zunächst wird der Betrieb im Laufe des Tages, anhand des 01.Mai und des 26.Mai näher betrachtet. Hierzu werden die Verläufe des Feed- Volumenstroms und der Destillatproduktionsrate für die betreffenden Tage in den nachfolgenden Graphiken dargestellt:

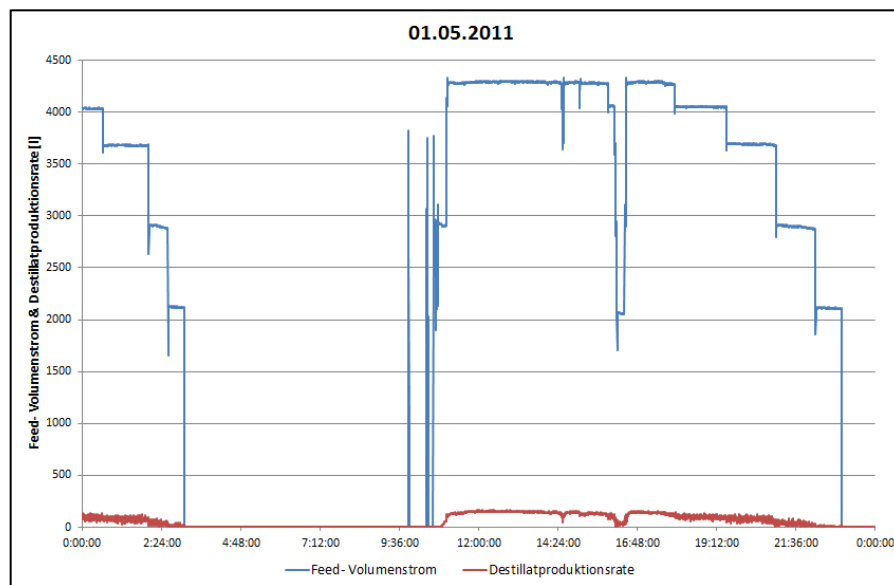


Abbildung 3-4: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage am 01.05.2011

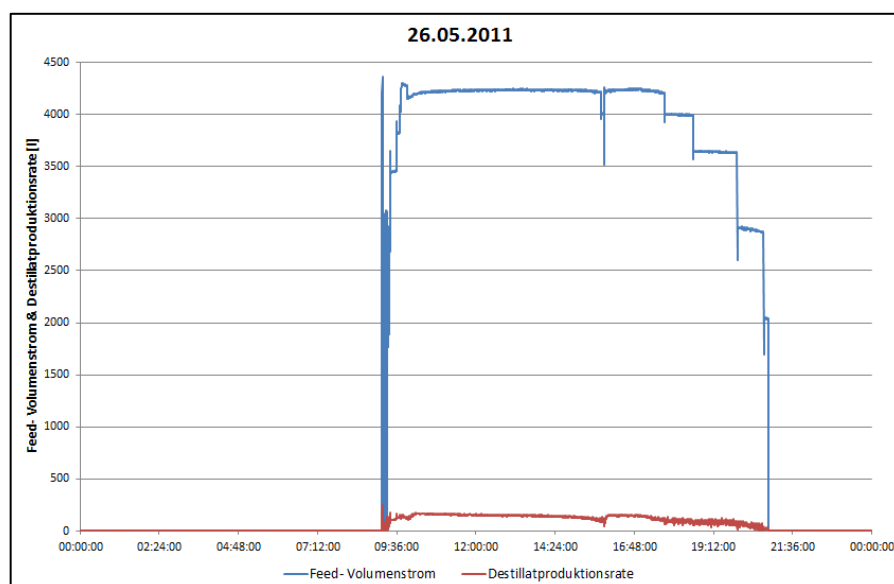


Abbildung 3-5: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage am 26.05.2011

Am Verlauf vom 01.Mai ist zu erkennen, dass die Anlage nachts bis um ca. 3.00 Uhr produziert hat, dann aufgehört hat zu laufen und zwischen 10.00 und 11.00 Uhr den Betrieb wieder aufgenommen hat. Ab da an lief sie bis 23.00 Uhr. Der maximale Durchfluss des Speisewassers beträgt ca. 4300 l/h und die maximale Destillatproduktionsrate liegt bei ca. 150 l/h. Am 26.Mai läuft die Anlage nachts nicht und produziert erst zwischen 9.00 und 21.00 Uhr Destillat. An beiden Tagen gab es einen relativ kleinen Einbruch des Feed-Volumenstroms um ca. 16.00 Uhr. Der Maximalwert des Feed- Volumenstroms und die maximale Destillationsproduktionsrate liegen an diesem Tag bei ähnlichen Werten wie am 01.Mai. Während den drei Monaten liegen die Destillatproduktionsrate im Durchschnitt bei 1,1 m³/d und der Feed- Volumenstrom bei 15,9 m³/d. Auf die Feed- Volumenströme wird im weiteren nicht implizit eingegangen, da der Schwimmer der Anlage in den drei zu betrachteten Monaten zwischenzeitlich defekt war und es infolgedessen zu viel zu hohen Feed-Volumenströmen kam. Die Betriebsdaten der drei Monate werden zum besseren Überblick in der folgenden Abbildung graphisch dargestellt.

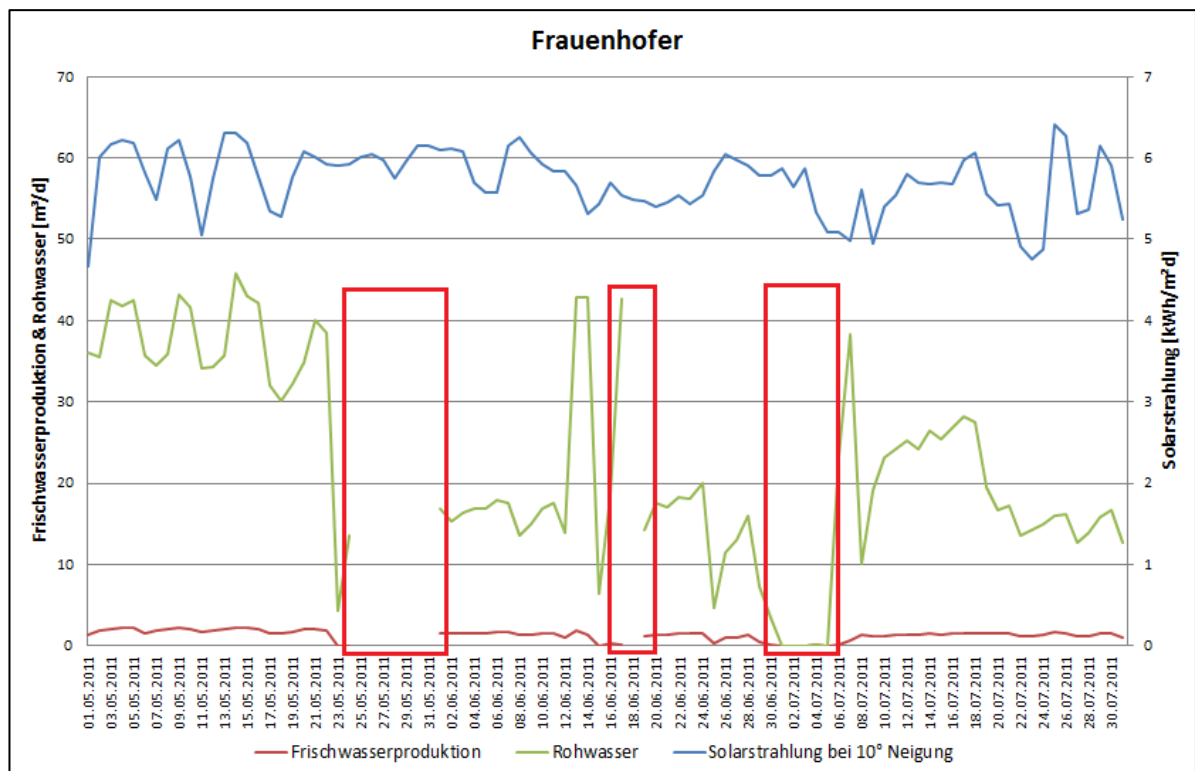


Abbildung 3-6: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage von Mai bis Juli

An der Graphik erkennt man, dass einige Daten fehlen. Die Daten vom 25.Mai bis zum 31.Mai fehlen, da die Anlage wegen dem defekten Schwimmer ausgefallen ist. Am 18.Juni fehlen die Daten, weil die Anlage gewartet (Service) wurde. Vom 30.Juni bis zum 06.Juli sind Daten vorhanden, jedoch sind die Werte in diesem Zeitraum annähernd Null. Die Anlage wurde während dieser Zeit mit Säure gespült.

3.3.1. Energieaufnahme der MD- Module

Zur Berechnung der GOR- Werte im folgenden Kapitel wird die Energiemenge benötigt, die von den MD- Modulen aufgenommen wird. Hierzu verwendet man die in Kapitel 2.4.1 angegebene Formel (2.16).

Zunächst wird für jeden Tag in 10 Sekunden- Intervallen die Temperaturdifferenz ΔT in Kelvin vor und nach dem Wärmeübertrager der Entsalzungseinheit bestimmt. In der Regel sollten diese positiv sein, jedoch schwankt an einigen Tagen die Differenz zwischen positiven und negativen Werten. Durch eine geringe Solarstrahlung an diesen Tagen, kommen ein sehr geringer Feed- Volumenstrom bzw. eine geringe Destillatproduktionsrate zustande. Hierdurch werden die Sensoren in der Hydraulik auf Grund ihrer Positionierung durch Wärmetransmission beeinflusst. Im Regelfall können die negativen Werte vernachlässigt werden, jedoch wenn der Feed- Volumenstrom zu gering ist, sollte die Energiemenge nicht betrachtet werden, damit die Energiebilanz aussagekräftig bleibt. Die Temperaturdifferenz wird dann mit dem Feed-Massenstrom multipliziert. Da nur Werte für den Feed-Volumenstrom vorliegen, der Massenstrom in Kilogramm pro Zeiteinheit allerdings für die Anwendung der Formel (2.16) benötigt wird, wird dieser mit der Dichte des Speisewassers umgerechnet. Die Dichte ist unter anderem abhängig von der Temperatur (Siehe Tabelle 2-2) und wird vereinfacht mit dem Mittelwert der Temperatur vor dem Wärmetauscher und nach dem Wärmetauscher bestimmt. Die spezifische Wärmekapazität des Speisewassers ist unter anderem abhängig vom Salzgehalt. Reines Wasser hat eine spezifische Wärmekapazität von $c_p = 4,182 \text{ kJ}/(\text{kgK})$. Durch die Hinzugabe von Salz wird die spezifische Wärmekapazität ca. 5% kleiner. Deswegen hat das Speisewasser vereinfacht eine spezifische Wärmekapazität von $c_p = 3,973 \text{ KJ}/(\text{kgK})$. Wird nun die spezifische Wärmekapazität mit der Temperaturdifferenz und dem Feed- Massenstrom multipliziert erhält man die Wärmeaufnahme der MD- Module für jede 10 Sekunden am Tag. Um einen Tageswert zu erhalten, wird über den Tag integriert. Um diese Werte wiederum mit den Strahlungswerten vergleichen zu können, werden sie auf $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{d})$ mit der Größe der Kollektorfläche (232 m^2) umgerechnet. Beide Werte werden in Anhang F tabellarisch und anhand einer Graphik dargestellt (Bergmann, L. & Schaefer, C., 2001).

Bei der Betrachtung der Wärmemenge über den Verlauf des Tages fallen einige Unterschiede auf. Diese werden mithilfe der Graphiken vom 01.05.2011 und vom 26.05.2011, beispielhaft für einen bewölkten und einen sonnigen Tag, dargestellt.

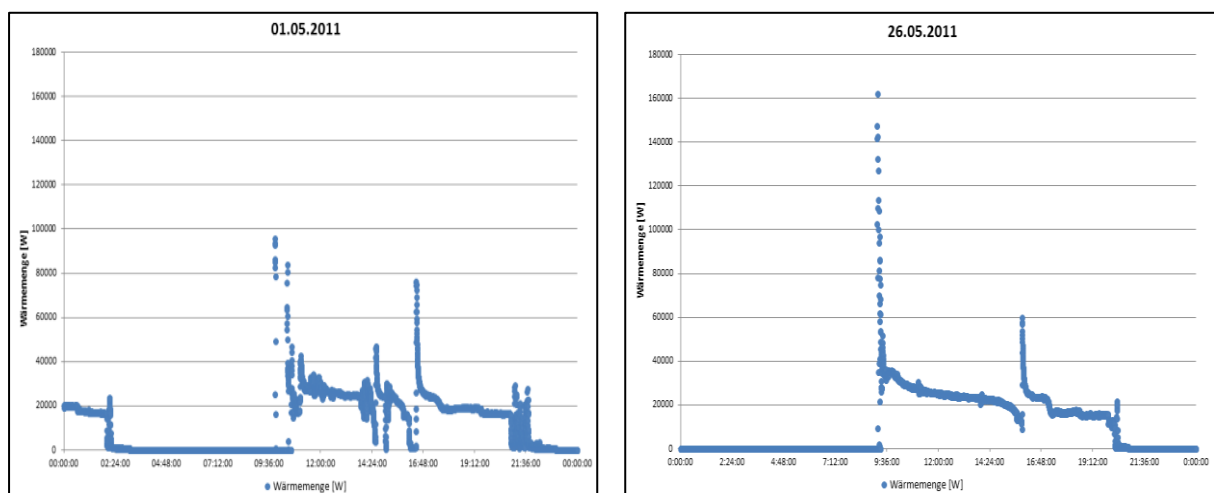


Abbildung 3-7: Wärmeaufnahme der MD- Module über den Tag vom 01.05 und 26.05.2011

Am 01. Mai kann man beobachten, dass die Module von Mitternacht bis um ca. 2.30 Uhr eine Wärmemenge von ca. 20.000 Watt aufnehmen. Ab 2.30 Uhr fällt die Wärmeaufnahme auf Null, da der Speicher leer ist, und springt dann plötzlich auf das

Maximum von ungefähr 100.000 Watt. Daraufhin schwankt die Wärmemenge bis um 21.30 Uhr zwischen 0 und 80.000 Watt, jedoch liegt zu dieser Zeit die Wärmeaufnahme der MD-Module im Durchschnitt bei ca. 20.000 Watt. Ab 21.30 Uhr wird die Wärmemenge, die die MD-Module aufnehmen wieder Null. Im Gegensatz dazu nehmen die Module am 26. Mai während der Nacht keine Wärmemenge auf, da der Speicher am Vortag nicht so stark geladen wurde und so die gespeicherte Wärme schon aufgebraucht war. Erst um ca. 9.30 Uhr steigt die Wärmeaufnahme aufgrund der Aufwärmphase von Null auf das Maximum von 160.000 Watt. So schnell wie die Wärmeaufnahme gestiegen ist, fällt sie jedoch wieder und pendelt sich dann zwischen 30.000 und 20.000 Watt ein. Um ca. 16.00 Uhr erreicht die Wärmeaufnahme einen Wert von ca. 10.000 Watt, steigt dann schlagartig wieder bis auf 60.000 Watt. Danach pendelt sich die Wärmeaufnahme bei knapp unter 20.000 Watt ein. Um ca. 21.00 Uhr fällt die Wärmeaufnahme wieder auf Null.

Auffällig ist, dass am 26. Mai, an dem die Globalstrahlung höher ist, die Wärmeaufnahme höher war als an dem Tag mit starker Bewölkung. Daraus kann man schließen, dass die Wärmeaufnahme von der Stärke der Globalstrahlung abhängt. Ein weiteres Merkmal ist, dass zum dem Zeitpunkt, an dem die Anlage zu laufen anfängt, die Wärmemenge, die die Module aufnehmen, stark zunimmt und sich danach einpendelt. Dies liegt daran, dass die Anlage zunächst hochfahren und aufheizen muss und dafür mehr Energie als beim kontinuierlichen Betrieb der Anlage benötigt. Jedoch erkennt man an dem Verlauf der Wärmeaufnahme an den beiden Tagen, dass um ca. 16 Uhr ein Sprung der Wärmeaufnahme stattfindet. Dies liegt vermutlich daran, dass wie schon im vorigen Kapitel beschrieben, um diese Uhrzeit ein kleiner Einbruch im Feed- Volumenstrom stattgefunden hat, dies müsste jedoch noch genauer überprüft werden.

Beim Vergleich der Tageswerte für die Wärmeaufnahme der MD-Module und für die Strahlungsdaten fällt auf, dass die Tageswerte für die Wärmeaufnahme um einiges geringer sind als die für die Strahlungsdaten. Diese Entdeckung wird durch die folgende Graphik der Monatsmittelwerte verdeutlicht.

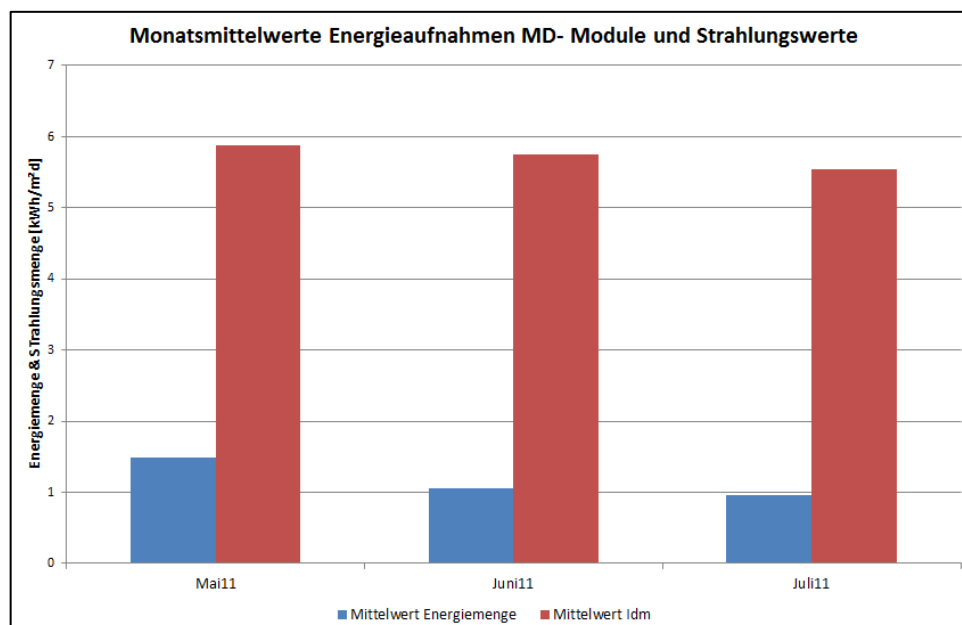


Abbildung 3-8: Monatsmittelwerte der Energieaufnahme MD-Module und der Strahlungswerte

Die Wärmemenge, die die MD- Module aufnehmen, liegt während der drei Monate im Mittel bei ca. 0,95 kWh/(m²d). Dahingegen liegen die Strahlungswerte im Mittel bei 5,72 kWh/(m²d). Die Differenz der Wärmeaufnahme zu den Strahlungswerten liegt im Durchschnitt bei 4,6 kWh/(m²d). Man erkennt zudem, dass das Verhältnis relativ gleichbleibend ist. Im Mai ist die Globalstrahlung am höchsten und im Juli am geringsten. Dem entsprechend verhält es sich bei der Wärmeaufnahme der MD- Module. Im Mai ist die Aufnahme am höchsten und im Juli am geringsten. Die Wärmeaufnahme der MD- Module liegt zwischen 0,2 und 1,8 kWh/(m²d), wohingegen die Solarstrahlung auf die geneigte Fläche zwischen 4,6 und 6,3 kWh/(m²d) liegt. Hieraus lässt sich eine Bilanz ermitteln die zwischen 5 und 28 % liegt. Somit wird von den MD- Modulen im Mittel 20,5 % der Globalstrahlung aufgenommen.

3.3.2. GOR- Werte

Wie schon in Kapitel 2.4.3 beschrieben ist der Gained- Output- Ratio ein Maß für die Wärmerückgewinnung und gibt Auskunft darüber, wie effizient eine Wasserentsalzungsanlage arbeitet. Somit werden im Folgenden die GOR- Werte für das gesamte System sowie die Werte für die MD- Module mittels der Gleichung (2.20) berechnet. Die GOR- Werte werden pro Tag berechnet, da die Destillatproduktionsrate in l/h alle 10 Sekunden festgehalten wurde, muss diese zunächst über den Tag integriert werden, damit man einen Tageswert der Destillatproduktionsrate erhält. Für die Berechnung der GOR- Werte wird zusätzlich weiterhin die Destillatproduktionsrate in kg/l benötigt, weshalb man die integrierten Werte in l/d mit der Dichte des Destillats in kg/l umrechnet. Die Dichte des Destillats ist abhängig von der Temperatur. Die Temperatur des Destillats wird allerdings nicht aufgezeichnet und wird vereinfacht mit einem Grad mehr angenommen, als beim Kondensator-Einlauf des Speisewassers, da das Destillat nur leicht wärmer ist als das Speisewasser. Im Durchschnitt hat das Destillat somit eine angenommene Temperatur von 29°C und eine Dichte von 1,0041 kg/l. Für die spezifische Verdampfungswärme wird, wie in Kapitel 2.4.3 erläutert, 0,6267 kWh/kg verwendet. Um die GOR- Werte für die MD- Module zu bestimmen, wird die im vorigen Kapitel berechnete Energiemenge, die von den MD- Modulen aufgenommen wird, als die Wärmemenge, die der Anlage zugeführt wird, angenommen. Bei der Bestimmung der GOR- Werte für das Gesamtsystem, werden die Strahlungswerte auf die um 10° geneigte Fläche (I_{dm}) verwendet. Die Strahlungswerte sind jedoch in kWh/(m²d) angegeben, weshalb man die Strahlungsmenge auf die gesamte thermische Kollektorfläche (232 m²) umrechnen muss. Bei der Berechnung ist zu beachten, dass die Hilfsenergie, die für den Prozess benötigt wird, unbeachtet bleibt. Alle berechneten GOR- Werte findet man in Anhang G. An Tagen, an denen der Feed- Volumenstrom bzw. die Destillatproduktionsrate fast Null ist, wurde kein GOR- Wert berechnet, da, wie schon im vorigen Kapitel beschrieben, die Sensoren in der Hydraulik durch Wärmetransmission über die Rohrleitungen beeinflusst werden und somit kein aussagekräftiges Ergebnis erzielt werden kann.

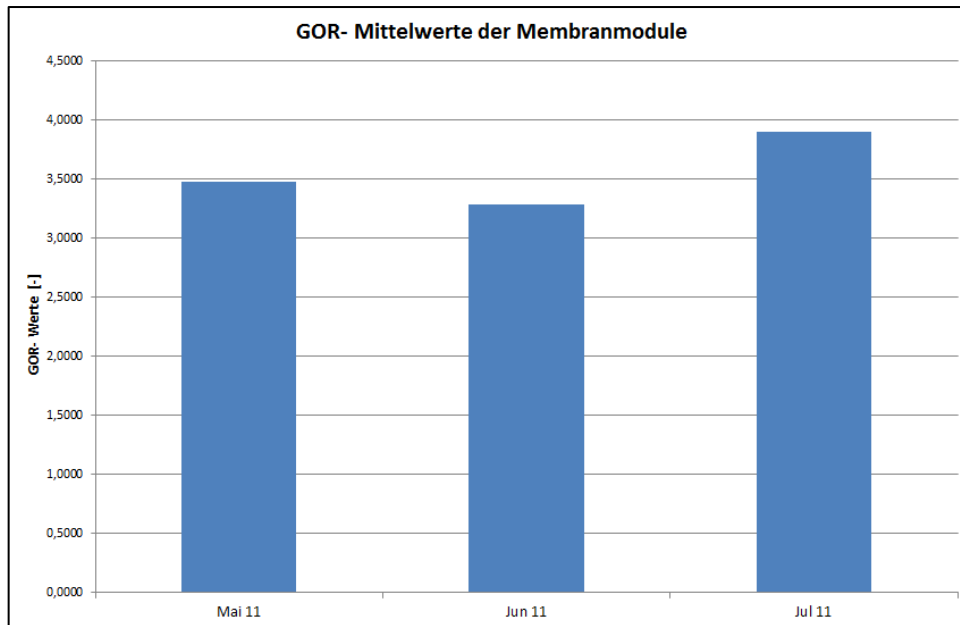


Abbildung 3-9: GOR- Monatsmittelwerte

In der obigen Abbildung sind die GOR- Mittelwerte für die Membranmodule dargestellt. Man erkennt, dass die GOR- Werte für die Module im Mittel zwischen 3,3 und 3,9 liegen. Der gesamte Mittelwert für die MD- Module liegt bei 3,55, wohingegen der Mittelwert für das Gesamtsystem, bezogen auf die Solareinstrahlungsmenge auf die um 10° geneigte Kollektorfläche, 0,73 beträgt. Mögliche Erklärungen für die geringen GOR- Werte in Verbindung mit der gesamten Einstrahlungsmenge sind vermutlich der Wirkungsgrad des Kollektors und Wärmeverluste über den Speicher und die Rohrleitungen, weshalb es sinnvoll wäre bei der Identifizierung von Optimierungspotenzialen an dieser Stelle anzusetzen. Der 08.05.2011 stellt einen repräsentativen Tag für den Mai dar, denn an diesem Tag liegt die Globalstrahlung bei dem Durchschnittswert der NASA von $5,32 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{d})$. Somit stellt auch der GOR- Wert für die Module an diesem Tag mit 3,51 einen typischen Wert für den Monat Mai dar. Für Juni stellt der 28.06.2011 einen repräsentativen Tag dar, an dem der GOR- Wert bei 3,33 liegt. Für Juli wird der 17.07.2011 als charakteristischer Tag gewählt. Hier liegt der GOR- Wert bei 3,79. An der obigen Abbildung 3-9 erkennt man, dass die repräsentativen GOR- Werte den Monatsmittelwerten entsprechen und somit die berechneten GOR- Werte sehr plausibel erscheinen.

Die täglichen GOR- Werte des betrachteten Zeitraums werden in der nachfolgenden Abbildung aufgezeigt.

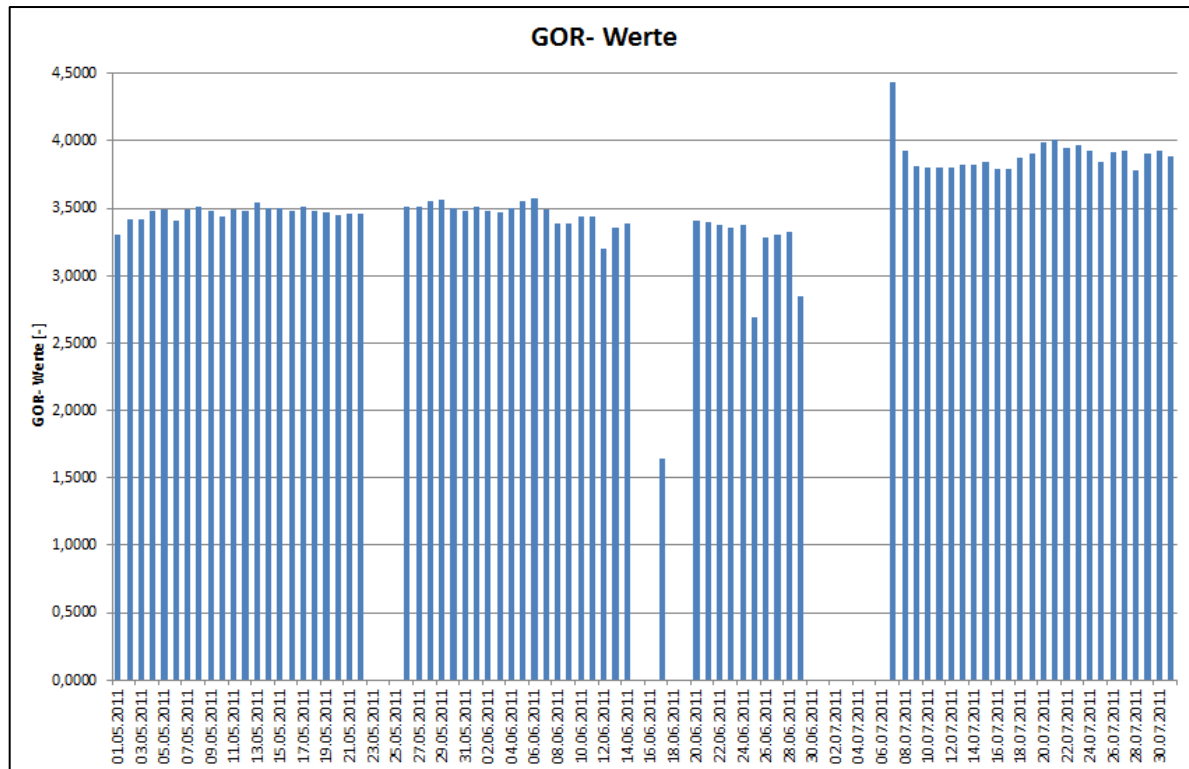


Abbildung 3-10: GOR- Werte von Mai bis Juli 2011

Auffällig ist an der Abbildung 3-10, dass die GOR- Werte stark schwanken. Die GOR- Werte für die Membranmodule liegen in diesem Zeitraum zwischen 1,6 und 4,4. Außerdem fällt vor allem in dieser Abbildung der 17. Juni auf, an dem die GOR- Werte nur halb so groß sind, wie an den anderen Tagen. Dies könnte daran liegen, dass an diesem Tag die Destillatproduktionsrate im Verhältnis zu den anderen Tagen relativ gering war. Außerdem ist zu beachten, dass die Anlage zwischen dem 30. Juni und 06. Juli kein Destillat produziert hat, woraufhin am folgenden Tag, der 07. Juli, der GOR- Wert mit ca. 4,5 den höchsten Wert erreicht. Auch die folgenden Tage im Juli weisen einen um ca. 0,5 höheren GOR- Wert auf als an den Tagen im Mai und Juni. Dies liegt vermutlich daran, dass zwischen dem 30.06.2011 und dem 06.07.2011 die Module mit Säure gespült wurden und danach die Effizienz der Anlage gesteigert wurde.

Um einen groben Überblick zu bekommen, in welchem Bereich sich die GOR- Werte der Membranmodule bewegen, werden im Folgenden einige veröffentlichte GOR- Werte von anderen Wasserentsalzungsanlagen vorgestellt. Diese sind jedoch nur bedingt mit den berechneten GOR- Werten der Membranmodule vergleichbar, da sie sich auf unterschiedliche Verfahren zur Wasserentsalzung beziehen. Jedoch auch, weil man keine genauen Angaben dazu findet, wie genau diese Werte zustande gekommen sind. Hierbei wäre es wichtig zu wissen, ob sie durch theoretische Modelle und Berechnungen oder durch konkrete und zutreffende Versuche ermittelt wurden. Somit dienen die folgenden Werte nur einer groben Orientierung.

Gemäß dem Skript „Simulation einer solaren Meerwasserentsalzungsanlage“ der TU Clausthal liegen die GOR- Werte von Meerwasserentsalzungsanlagen zwischen 1 und 3 (TU Clausthal, 2010). Diese Werte werden von den GOR- Werten für die Module mit einem Mittelwert von 3,6 überschritten. Laut einer Veröffentlichung von Prof. Dr. Klemens Schwarzer liegen die

GOR- Werte hingegen bei der konventionellen und der solaren Trinkwassererzeugung zwischen 3 und 4 (Schwarzer, Prof. Dr. K., 2011). Die berechneten GOR- Werte für die MD-Module liegen genau in diesem Bereich. Die „Multiple Effect Distillation“- Anlage (MED) der Firma Fischer mit einer Leistung von 20 bis 1.000 m³ Wasser pro Tag erreicht GOR- Werte zwischen 3 und 10, welche abhängig von der Anzahl der Stufen sind (Fischer eco solutions Germany, 2011). Auch laut Peter Stenzel liegen die GOR- Werte von Entsalzungsanlagen auf Basis von MSF oder MED Verfahren Zwischen 8 und 15 (Stenzel, P., 2012). Gemäß dem Center for Desalination Research and Capacity Building e. V. beträgt der GOR- Wert bei MED und thermal vapour compression Verfahren 7. Es fällt auf, dass die GOR- Werte der MD-Module der Membrandestillationsanlage teilweise unter den GOR- Werten für Anlagen zur Wasserentsalzung, welche mit einem anderen Verfahren betrieben werden, liegen. Somit sind eindeutig Optimierungspotentiale bei diesem Verfahren der Wasserentsalzung vorhanden.

3.4. Betriebsdaten der Photovoltaikanlage

Die Photovoltaikanlage besteht aus 6 mal 15 Solarmodulen, welche eine Gesamtfläche von 142 m² aufweisen und mit einer Neigung von 10° montiert sind. Die Solargeneratoren werden mithilfe dreier PV- Netzwechselrichtern in das Versorgungssystem eingebunden. Die PV-Netzwechselrichter werden auch „Sunny Boy“ genannt und wandeln den von den Solargeneratoren erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom um. Der Strom wird dann zum Verbraucher oder zu den drei Inselwechselrichtern geleitet. Diese drei Inselwechselrichter, auch „Sunny Islands“ genannt, wandeln den übrig gebliebenen Strom wieder in Gleichstrom um, damit dieser von den vorhandenen Batterien gespeichert werden kann. Die wichtigste Aufgabe der „Sunny Islands“ ist somit für die optimale Ladung und Entladung der Batteriesätze zu sorgen. Die Batteriespeicher sind dafür zuständig auch während Schlechtwetterperioden oder während der Nacht Energie Bereit zu stellen. Sein Speicher ist ca. 1500 Ah groß und hat eine Autonomiezeit beim reinen Verbrauch in der Nacht von 2 Nächten. Die Autonomiezeit bei einer Laufzeit über den gesamten Tag beträgt 0,64 Tage. Falls der Batteriespeicher unter 45% fällt springt ein Diesलगenerator automatisch an, um die Stromversorgung weiterhin zu sichern, und schaltet sich auch wieder automatisch aus. Die Anlage ist so ausgelegt, dass der täglich anfallende Energiebedarf zu 100% gedeckt ist. Eine Erhöhung des Verbrauchs ist mit dem vorhandenen System nicht durchführbar. Jedoch ist es möglich, das System durch weitere Solargeneratoren sowie Windgeneratoren, zu erweitern und an den eventuell wachsenden Energiebedarf anzupassen. Zurzeit wird die Anlage als Inselssystem betrieben, sie kann aber auch ohne erhöhten Aufwand an das öffentliche Netz angebunden werden (juwi Holding AG, 2010a).

Um den Arbeitsverlauf der Photovoltaikanlage besser analysieren bzw. bewerten zu können, werden vor allem der Batterieladezustand, die Temperatur der Batterien und der Stromfluss in den Batterien genauer betrachtet. Der Batterieladezustand gibt Aufschluss darüber inwieweit die Energieproduktion in den Solarpanels ausreichend ist. Über die Temperatur können mögliche Defekte ausgeschlossen oder vermutet werden. Der Stromfluss in den Batterien wird betrachtet, da keine Daten zur Stromerzeugung in der PV- Anlage vorhanden sind und diese dadurch abgeschätzt werden können.

Im Folgenden werden diese drei Parameter beispielhaft am 01.Mai 2011 und am 26.Mai 2011 dargestellt und erläutert. Diese Tage stehen für einen eher bewölkten Tag und für einen sonnigen Tag, somit kann man die Auswirkungen, die das Wetter auf die Parameter hat, identifizieren.

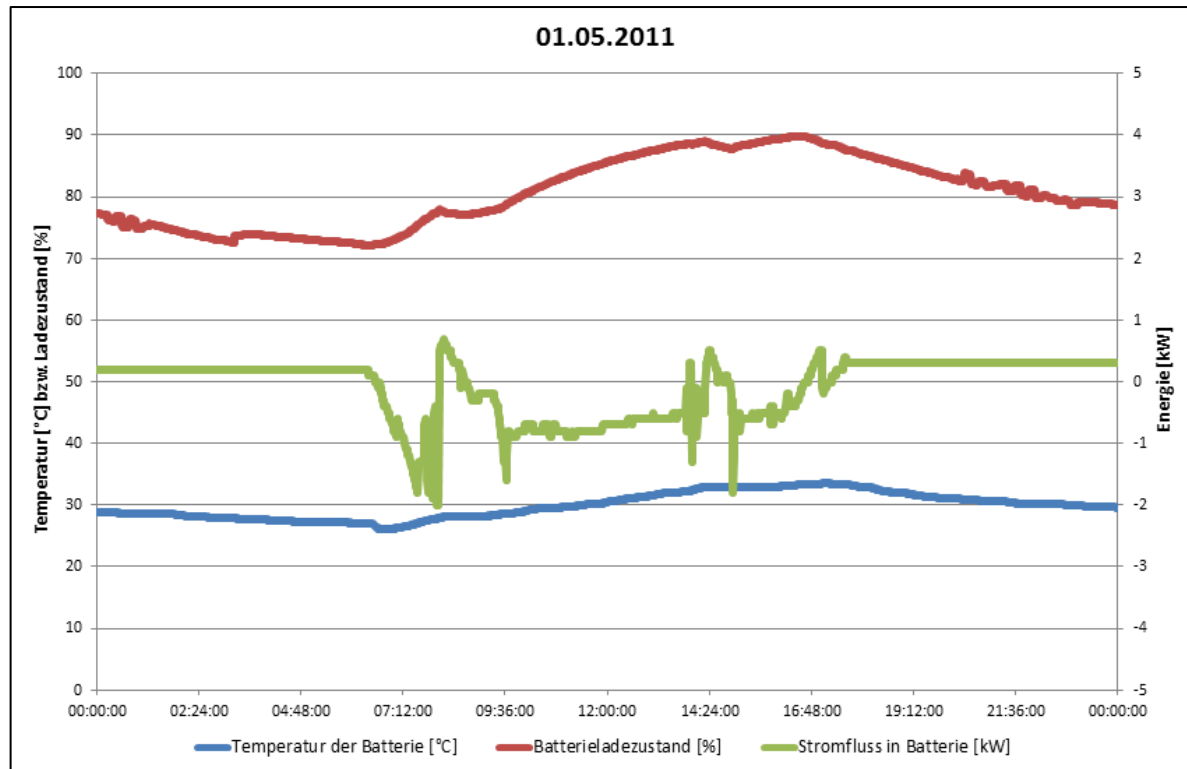


Abbildung 3-11: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage am 01.05.2011

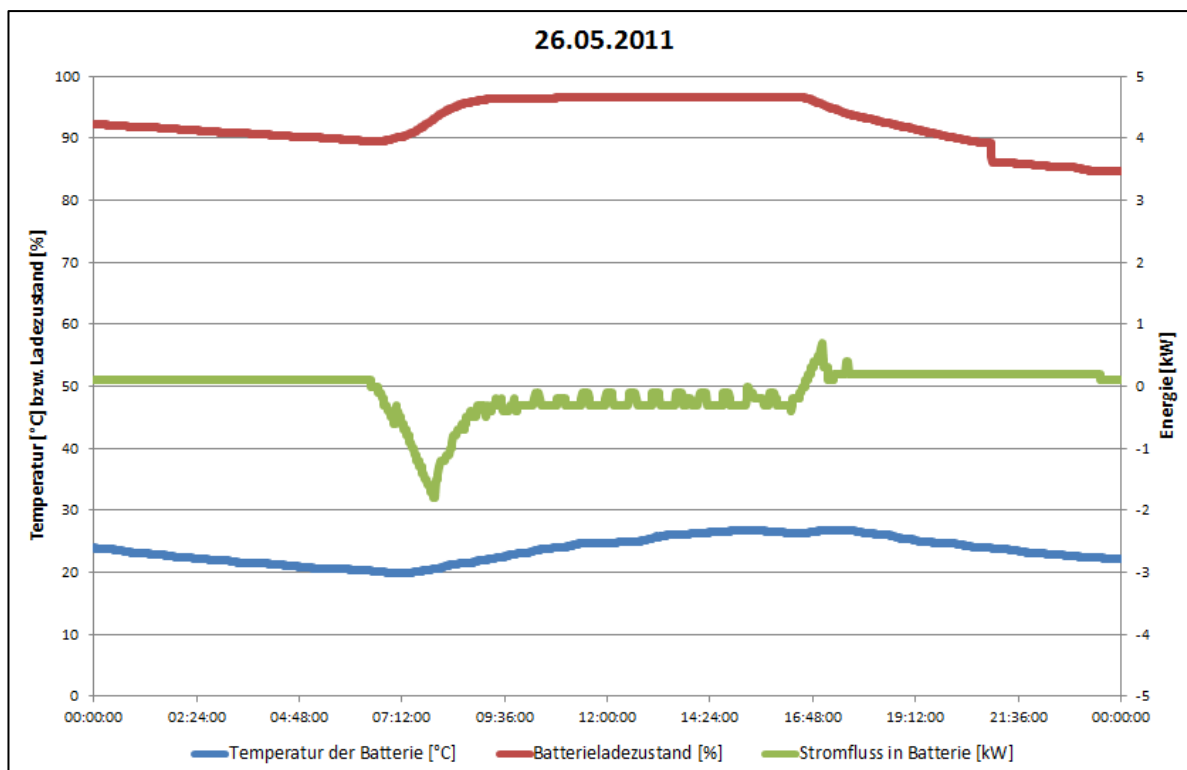


Abbildung 3-12: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage am 26.05.2011

Zunächst werden die Verläufe des Batterieladezustands betrachtet. Fällt die Kurve, bedeutet dies, dass Strom von der Batterie für die Membrandestillations- oder Umkehrosmoseanlage gezogen wird. Steigt der Verlauf der Kurve, wird die Batterie über die Photovoltaikanlage aufgeladen. Bleibt der Batterieladezustand jedoch konstant, wird gerade genug Strom

produziert, um die Anlagen zu versorgen oder die maximale Aufladekapazität der Batterie ist erreicht. Am 01. Mai erkennt man, dass der Ladezustand über Nacht ungefähr bei 75% liegt. Ab ca. 7.00 Uhr fängt der Batterieladezustand, von knapp über 70%, an zu steigen. Er steigt leicht schwankend bis zum Maximum von ca. 90% um ca. 16.30 Uhr an. Von dort aus sinkt der Ladezustand wieder und liegt über Nacht zwischen 70 und 80%. Beim Vergleich mit dem 26. Mai fällt auf, dass der Batterieladezustand im Allgemeinen wesentlich höher ist, als am 01. Mai. Über Nacht liegt der Batterieladezustand bei ca. 90% und steigt dann von 7.00 Uhr bis 9.00 Uhr auf ca. 97%. Der Batterieladezustand bleibt über ca. 9 Stunden konstant auf 97% und fällt erst um 16.00 Uhr auf ca. 85%. Man erkennt in dem Verlauf der Kurve einen kleinen Sprung um 21.00 Uhr, auf dieses Phänomen wird im weiteren Verlauf noch genauer eingegangen. Beim Betrachten der Graphiken fällt auf, dass die Batterien größtenteils nur nachts verwendet werden. Zu diesem Zeitpunkt ist keine Solarstrahlung vorhanden und die Photovoltaikanlage kann keinen Strom produzieren, jedoch werden die Messgeräte und Computer auch nachts betrieben und verbrauchen deshalb zu dieser Zeit Strom. Nach dem Sonnenaufgang steigt der Batterieladezustand, da die Photovoltaikanlage zu diesem Zeitpunkt wieder in der Lage ist Strom zu produzieren. Der Verlauf des Stromflusses verdeutlicht den Ladeprozess der Batterie zusätzlich. Beim Ladeprozess der Batterie wird der Stromfluss negativ. Der energetisch optimalste Zustand ist erreicht, wenn der Stromfluss näherungsweise bei Null liegt, denn dann wird der gesamte, von der Photovoltaikanlage produzierte Strom, für die Wasserentsalzungsanlagen verwendet und es entsteht kein Verlust für die Aufladung der Batterien. Besonders gut ist in den Graphiken der Einfluss des Wetters sichtbar. Am 01. Mai, welcher ein bewölkter Tag war, dauert die Aufladung der Batterie bis zum Maximum von 90% ca. 9 Stunden. Dahingegen liegt das Maximum am 26. Mai bei 97% und die Aufladung dauert nur 2 Stunden. Am 26. Mai bleibt der Ladezustand der Batterie langezeit konstant bei 97%, da die Photovoltaikanlage genügend Strom produziert, sodass die Batterien nicht genutzt werden müssen. Dies erkennt man auch an dem Verlauf des Stromflusses in der Batterie, der an diesem Tag nur kurz bis auf -2 kW sinkt und dann im Laufe des Tages bei ca. 0 kW liegt. Jedoch lag der Batterieladezustand am Tag zuvor auch relativ hoch, sodass nicht viel Strom in die Batterie zum Aufladen fließen musste. Am 01. Mai hingegen liegt der Stromfluss in der Batterie zwischen Sonnenaufgang und 16.00 Uhr zwischen -1 und -2 kW, dies lässt erkennen, dass die Batterien bis 16.00 Uhr aufgeladen wurden, dann aber für den Betrieb der Wasserentsalzungsanlagen dazu geschaltet wurden und somit auf Grund der ungünstigen Witterungsbedingungen nicht vollständig aufgeladen werden konnten. Die Temperatur der Batterien weist keinerlei Störung auf. Sie liegt im Durchschnitt bei 30°C.

Beim Bearbeiten der Daten der Photovoltaikanlage ist aufgefallen, dass an jedem Tag um ca. 20.00 Uhr ein Sprung von 3% im Batterieladezustand erfolgt. Diesen erkennt man in der anschließenden Graphik vom 07. Juni 2011:

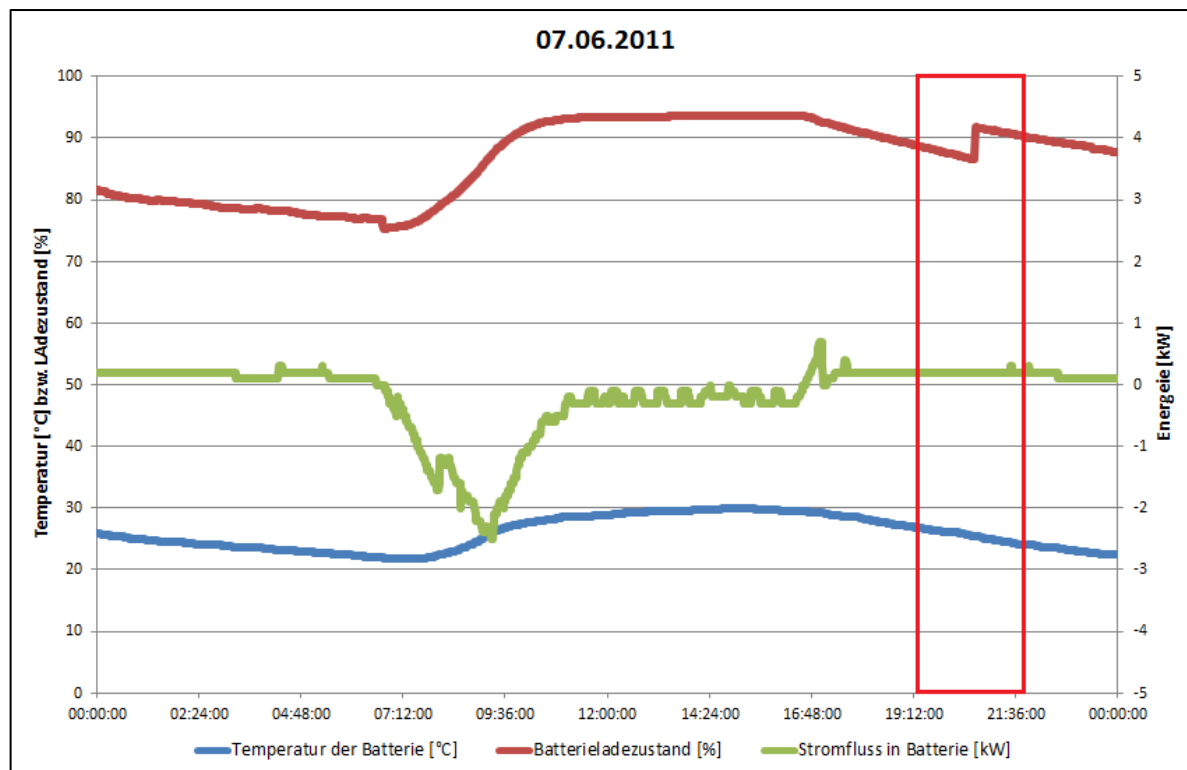


Abbildung 3-13: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage am 07.06.2011

Das Batteriemanagementsystem des „Sunny Islands“ bestimmt den Batterieladezustand durch die Bilanzierung der Amperestunden und durch Messungen der Batteriespannung. Wird somit die Batterie gut zyklisiert, also es gibt viele Lade- und Entladezyklen, wird die Berechnung des Batterieladezustands genauer. Im vorliegenden Fall werden die Batterien allerdings nur wenig zyklisiert, sodass nur wenige Daten zur Verfügung stehen. Auf dieser Datenbasis berechnet das Batteriemanagementsystem eine Prognose, welche mit den gemessenen Daten nach der Entladung der Batterien verglichen werden. Stimmen sie nicht überein, wie in diesem Fall, wird durch den Wechselrichter eine Rekalibrierung durchgeführt, wodurch der Batterieladezustand sprunghaft angepasst wird. Dieses Phänomen ist bei wenig zyklisierten Batterien oft der Fall und technisch unbedenklich. Erst bei Sprüngen über 20% sollten weitere Maßnahmen, wie Überprüfungen aller Verbindungen auf Lockerungen und Korrosionsschäden, durchgeführt werden, damit eine Veränderung des Batterieinnenwiderstandes ausgeschlossen werden kann (Krüger, 2012).

Im Anhang H sind die drei betrachteten Werte für Mai und Juni zur besseren Übersicht zusammengefasst dargestellt. Hier erkennt man, dass der Batterieladezustand jeden Tag über 90% kommt und nie gravierend unter 70% fällt.

4. Identifizierung von Kapazitätsreserven

4.1. Auswirkungen der Globalstrahlung auf den Betrieb der Membrandestillations- sowie Photovoltaikanlage

Das Ziel dieser Thesis ist es, die Auslastung der Photovoltaikanlage zu untersuchen sowie die Kapazitätsreserven der Anlagen zu identifizieren. Hierzu ist es wichtig den Zusammenhang zwischen der Globalstrahlung und dem Betrieb der Membrandestillations- sowie der Photovoltaikanlage zu verstehen. Um die Auswirkungen der Globalstrahlung festzustellen, werden die ausgewerteten Betriebsdaten aus Kapitel 3 verglichen. Zunächst wird ein Tag mit hohen Globalstrahlungswerten, also ein sonniger Tag, betrachtet. Hierzu wurde bereits in Kapitel 3 der 26.05.2011 gewählt. Für den Tag mit geringer Globalstrahlung wurde in Kapitel 3 der 01.05.2011 gewählt, dies ist ein repräsentativer Tag für einen bewölkten Wintertag in Namibia. Die Tage während dem betrachteten Zeitraum sind meistens sonnig und nur gelegentlich etwas bewölkt. Somit werden im Folgenden die Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage sowie der Photovoltaikanlage mit der Globalstrahlung zum Vergleich an den betreffenden Tagen dargestellt.

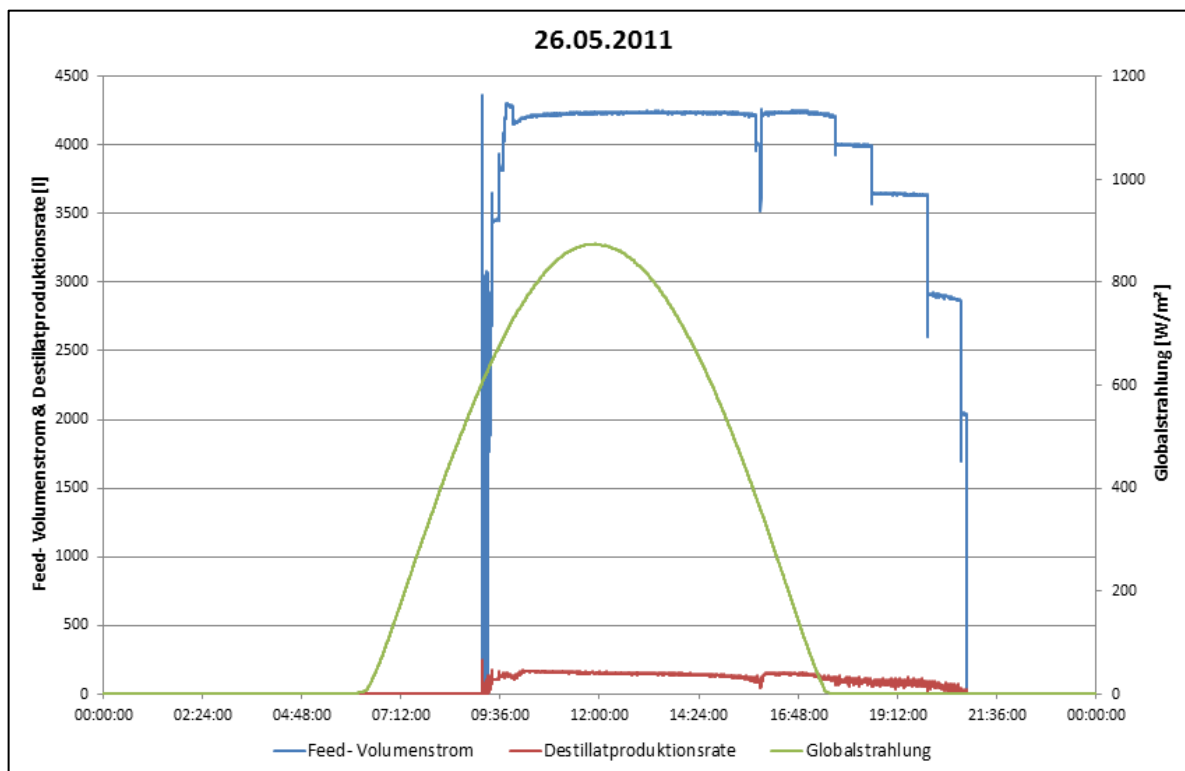


Abbildung 4-1: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage im Vergleich mit der Globalstrahlung am 26.05.2011

Zunächst werden die Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage betrachtet. Anhand der Abbildung 4-1 erkennt man, dass die Sonne am 26.Mai um ca. 6.30 Uhr aufgeht, jedoch die Anlage erst gegen 9.00 Uhr zu laufen anfängt. Anschließend produziert die Anlage bis ca. 21.00 Uhr Destillat, sie läuft also noch 3,5 Stunden nach Sonnenuntergang, welcher um 17.30 Uhr stattfand. Ähnlich ist dies am 01.Mai. Hier startet der Betrieb der Anlage ca. 4 Stunden nach Sonnenaufgang und endet 5,5 Stunden nach Sonnenuntergang. Dabei erkennt man an der Abbildung 4-2, dass vom 30. April auf den 01.Mai die Anlage auch nachts gelaufen ist und somit zu dieser Zeit Strom für die Anlage von den Batterien bezogen wurde.

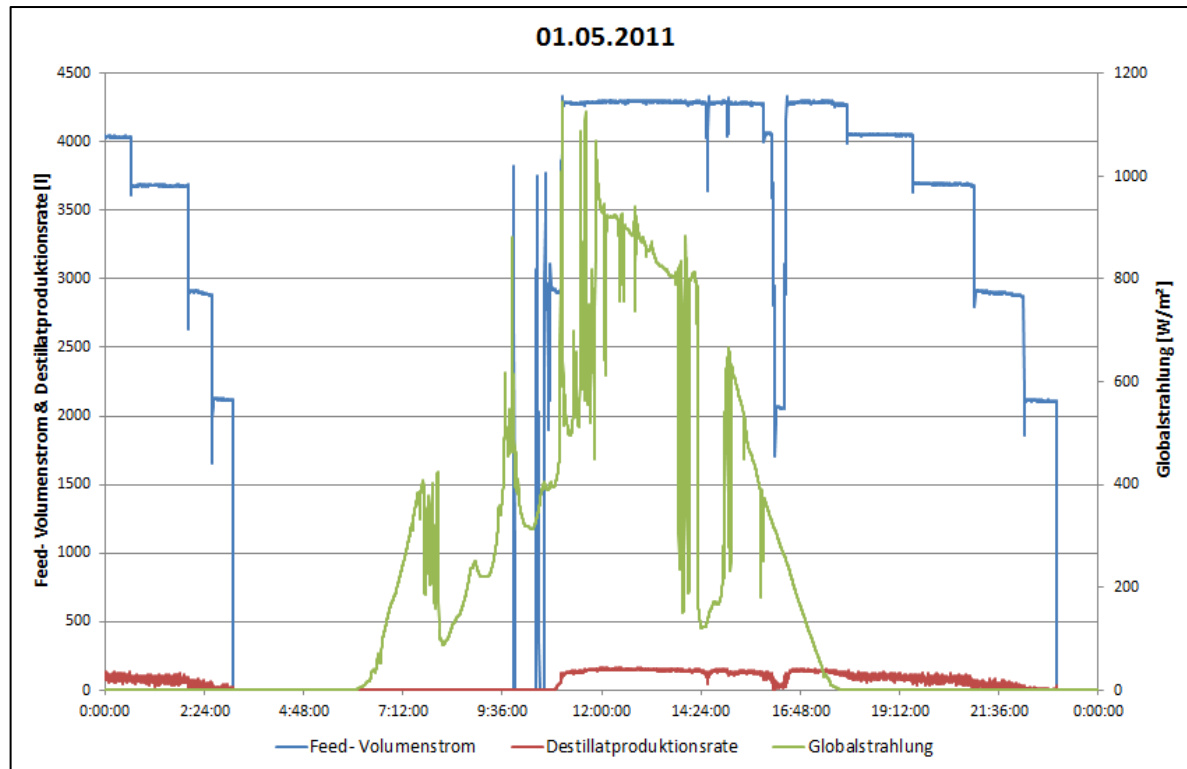


Abbildung 4-2: Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage im Vergleich mit der Globalstrahlung am 01.05.2011

An beiden Tagen sind der Feed- Volumenstrom und die Destillatproduktionsrate relativ gleich groß und der Betrieb der Anlagen weicht zeitlich vom Sonnenauf- und Untergang ab, weshalb man annehmen könnte, dass die Produktion unabhängig von der Globalstrahlung abläuft. Betrachtet man allerdings die nachfolgende Graphik kommt man zu einem anderen Schluss. Die Abbildung 4-3 zeigt die Betriebsdaten der Membrandestillationsanlage vom 01.Mai bis zum 20.Mai 2011 im Vergleich mit der Globalstrahlung auf die um 10° geneigte Fläche. Hier fällt auf, dass die Solarstrahlung den Betrieb der Anlage beeinflusst. Ist die Solarstrahlung hoch steigt auch die Produktionsrate, ist sie dagegen eher gering sinken die Destillatproduktion sowie der Feed- Volumenstrom. Dies liegt an dem Zweikreisssystem der Membrandestillationsanlage, da hier ein Warmwasserspeicher im System mit eingebunden ist, der den Betrieb der Anlage beeinflusst. Die gleich hohen Feed- Volumenströme an den betrachteten zwei Tagen kommen vermutlich durch den defekten Schwimmer, der schon in Kapitel 3.3 erwähnt wurde, zustande. Somit sollte man diese Tatsache weitestgehend unbeachtet lassen.

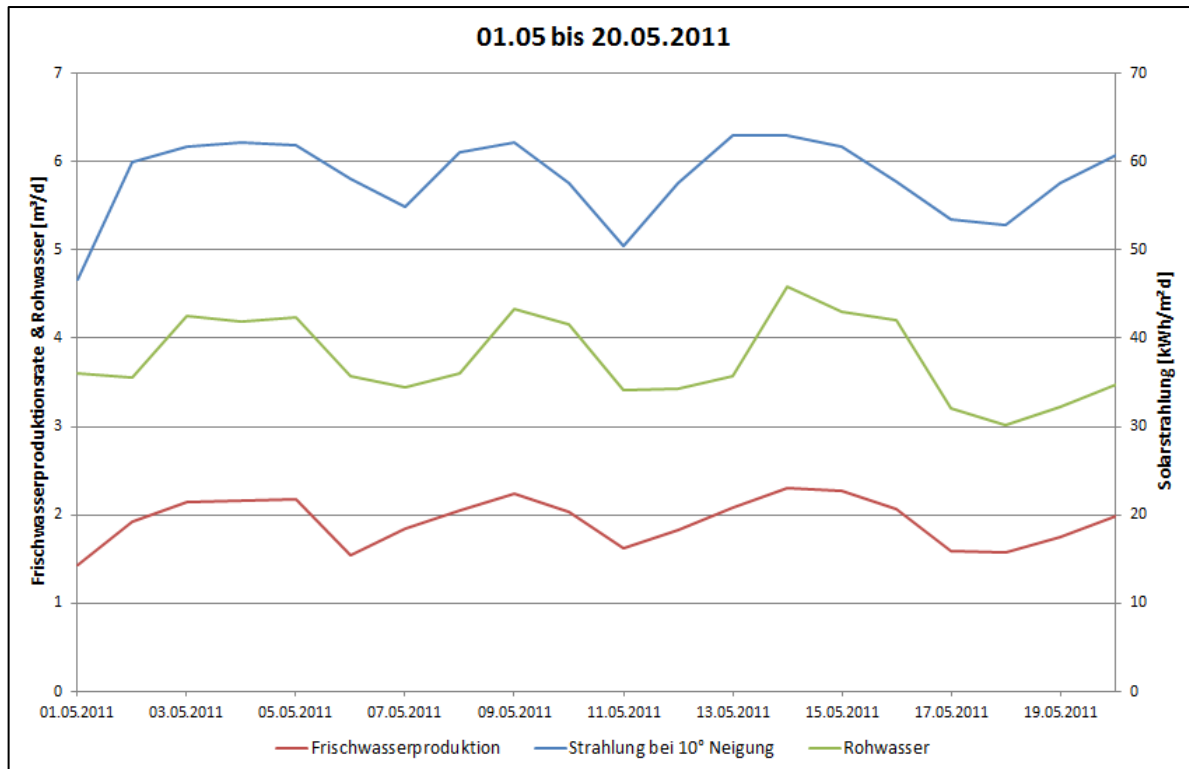


Abbildung 4-3: Betriebsdaten der Membrandestillationsrate vom 01.05 bis zum 20.05.2011

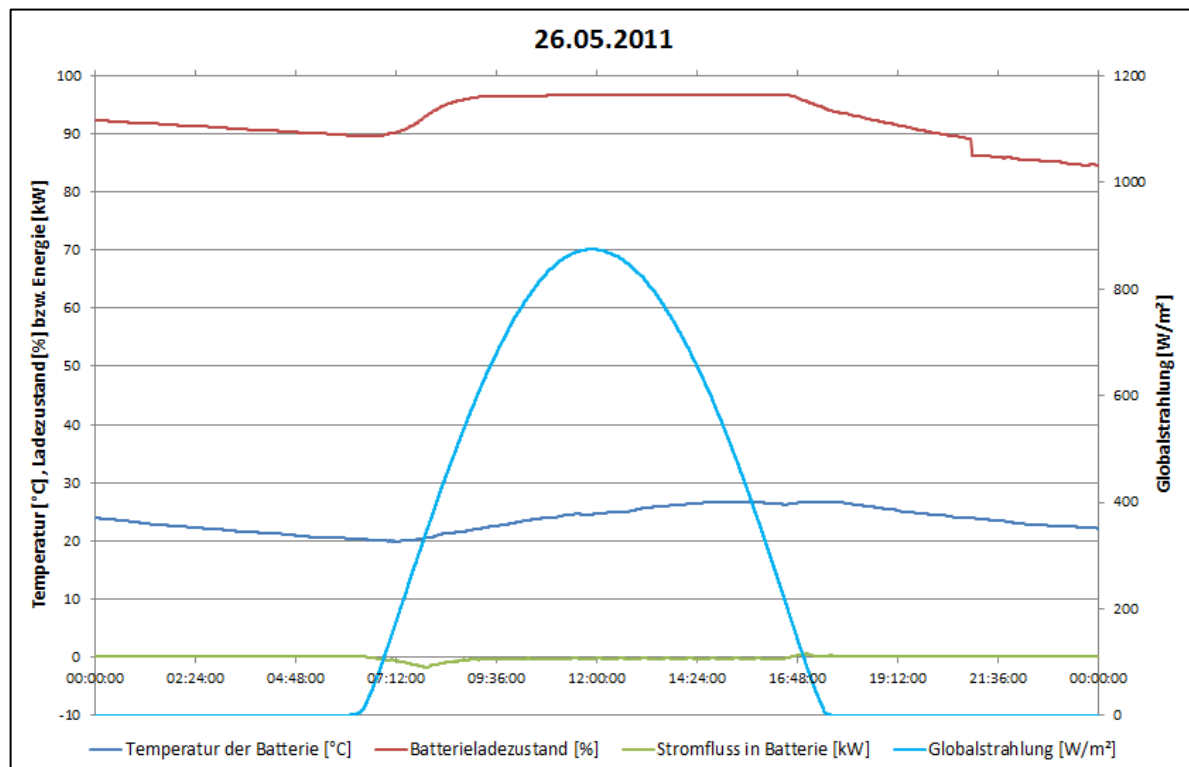


Abbildung 4-4: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage im Vergleich mit der Globalstrahlung am 26.05.2011

Vergleicht man die Daten der Photovoltaikanlage mit der Globalstrahlung am 26. Mai anhand der obigen Abbildung 4-4, erkennt man, dass der Aufladeprozess der Batterie zum Zeitpunkt des Sonnenaufganges beginnt und das Maximum des Ladezustands schon vor dem Maximum

der Globalstrahlung erreicht ist. Somit könnte ab 9.00 Uhr der gesamte Strom der von der Photovoltaikanlage produziert wird für die Wasserentsalzungsanlagen genutzt werden. Nach ca. 17.00 Uhr, also nach dem Sonnenuntergang, wird die Batterie wieder genutzt und der Ladezustand sinkt.

Am 01.Mai hingegen dauert der Aufladeprozess der Batterie um einiges länger als der am 26.Mai. Er beginnt zwar auch mit dem Sonnenaufgang, jedoch erreicht der Ladezustand das Maximum an diesem Tag um einiges später als die Globalstrahlung ihr Maximum erreicht. Außerdem liegt das Maximum des Batterieladezustands an diesem Tag deutlich unter dem Maximum vom 26.Mai. Demnach wurde die Batterie nicht vollständig geladen, bevor die Batterie nach Sonnenuntergang wieder in Betrieb genommen wird. Die Betriebsdaten der Photovoltaikanlage im Vergleich mit der Globalstrahlung am 01.Mai werden in der folgenden Abbildung dargestellt.

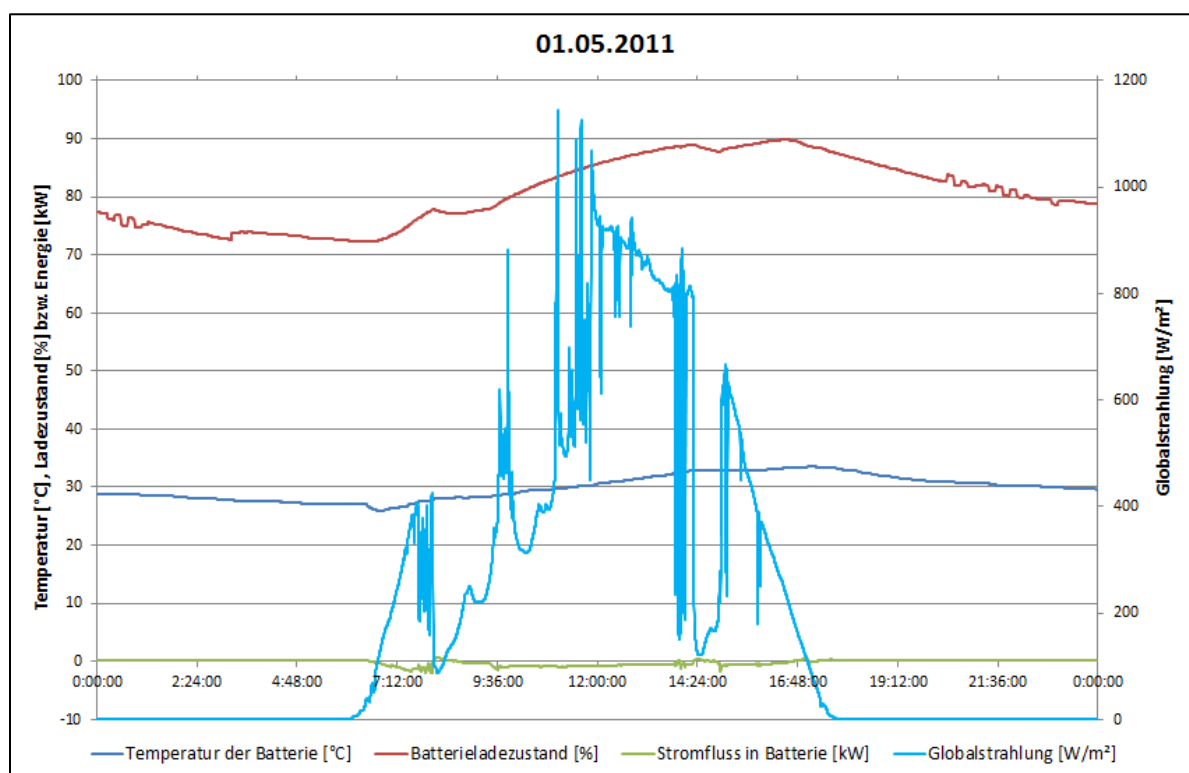


Abbildung 4-5: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage im Vergleich mit der Globalstrahlung am 26.05.2011

Um eine Aussage über die Auslastung der Photovoltaikanlage treffen zu können, sind vor allem kritische Situationen im Ladeverlauf der Batterien von Interesse. Der Ladeverlauf der Batterien von den Monaten Mai und Juni sind in Anhang H dargestellt. Jedoch fallen keine kritischen Situationen bei der Betrachtung der Ladeverläufe über die 2 Monate auf. Der Ladezustand liegt nur einmal knapp unter 70%, in der Nacht vom 15. auf den 16.Mai, und ansonsten ist es immer mehr als 70%. Außerdem wird im Laufe des Tages die Batterie immer mindestens bis 90% aufgeladen. In dem betrachteten Zeitraum von zwei Monaten kommt es auch nicht vor, dass an mehr als zwei aufeinanderfolgenden Tagen die Globalstrahlung bei oder unter 4 kWh/(m²d) liegt. Nur am 18.Juni und am 19.Juni liegt die Globalstrahlung bei 4 kWh/(m²d), dies hat jedoch keine Auswirkungen auf den Ladezustand der Batterien, wie man in der folgenden Abbildung 4-6 erkennen kann. Vermutlich hängt dies damit zusammen, dass am 18.Juni die Membrandestillationsanlage, wegen einer Wartung, ausgeschaltet war und

keinen Strom verbraucht hat, wodurch mehr Strom in der Batterie gespeichert werden konnte. Man erkennt sogar, dass der Ladezustand der Batterie in der betreffenden Nacht nicht gravierend unter 95% fällt, da nur wenig Strom von der Batterie gezogen wird.

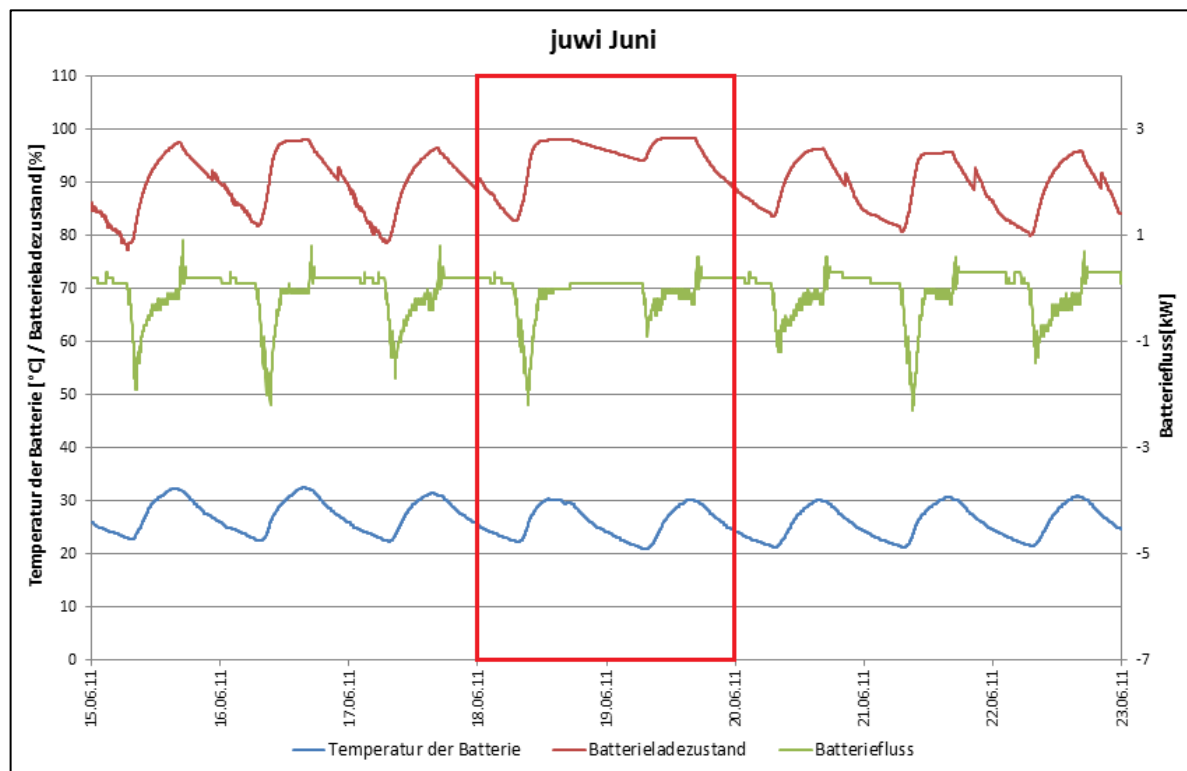


Abbildung 4-6: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage vom 15.06. bis zum 23.06.2011

Somit lässt sich abschließend aus diesem Kapitel schließen, dass im namibischen Winter genug Strom durch die Solarpanels erzeugt wird, um die Wasserentsalzungsanlagen sowie die Batterien mit genügend Strom zu versorgen. Diese Vermutung beruht darauf, dass die ermittelten Globalstrahlungswerte zu dieser Zeit den Werten, die von der NASA ermittelt wurden, entsprechen (siehe Kapitel 3.2). Im Winter sind die Globalstrahlungswerte dort niedriger als im Sommer, jedoch kommt es zu dieser Zeit relativ selten vor, dass der Himmel vollkommen bedeckt ist. Es ist meistens sonnig. Somit kann mehr Strahlung von den Solarpanels genutzt werden, da es selten zu sehr schlechten Globalstrahlungswerten kommt. Grundsätzlich sollte man sich genauer mit Zeiträumen beschäftigen, die an aufeinanderfolgenden Tagen schlechte Witterungsbedingungen aufweisen, um mögliche Engpässe zu identifizieren. Auf die genaue Energiebilanz und die möglichen Energiereserven der Anlage wird in den folgenden Kapiteln im Detail eingegangen.

4.2. Energiebilanz der gesamten Anlage

Um einen groben Überblick über die Auslegung und mögliche Kapazitätsreserven der gesamten Anlage zugeben, wird eine Energiebilanz erstellt. Zunächst wird die potentielle, in den Solarpanels erzeugte Energie berechnet. Diese erhält man, indem man das Jahresmittel der solaren Einstrahlung mit der Fläche der PV- Kollektoren multipliziert. Das Jahresmittel wird aus der Projektbeschreibung der Firma juwi (juwi Holding AG, 2010a) entnommen, welches 5,38 kWh/(m²d) beträgt. Die Fläche der Kollektoren beträgt in diesem Fall 142 m² (CuveWaters, 2010). Somit erhält man eine potentielle Energie von 763,96 kWh/d, die die Solarpanels erzeugen können. Der Wirkungsgrad der Anlage lässt sich mithilfe des

Energiebedarfs der Anlagen bestimmen, da der Energiebedarf etwa der tatsächlich von den Solarpanels erzeugten Energie entspricht. Die hierzu benötigten Annahmen über den Energiebedarf der Anlagen werden auch der Projektbeschreibung der Firma juwi (juwi AG, 2010a) entnommen, da nach diesen Werten die PV- Anlage ausgelegt wurde:

	Energiebedarf Anlagen		
	Tags	Nachts	Gesamt
ProAqua	24,5	5,7	30,2
Fraunhofer	15,8	8,8	24,6
Pumpe	13	0	13
Gesamt	53,3	14,5	67,8

Tabelle 4-1: Energiebedarf der Anlagen in Amarika
(juwi Holding AG, 2010)

Den Wirkungsgrad der Anlage erhält man, indem man die tatsächlich produzierte Energiemenge durch die potentiell mögliche Energiemenge dividiert. Somit beträgt der Wirkungsgrad 8,88 %.

Um eine Energiebilanz für den betrachteten Zeitraum zu erstellen, werden die angenommenen Werte auf die tatsächlich gemessenen Tageswerte angewendet. Zunächst wird pro Tag die potentielle Energie in [kWh/d] berechnet. Hierzu wird die Fläche der Kollektoren, welche eine Größe von 142 m² haben, mit der Globalstrahlung multipliziert. Die hierfür benötigten Werte für die Globalstrahlung auf die um 10° geneigte Fläche werden aus Kapitel 3.2 übernommen. Wird nun die potentielle Energie mit dem im Voraus berechneten Wirkungsgrad von 8,88% multipliziert, erhält man die tatsächlich von den Solarpanels produzierte Energiemenge in [kWh/d]. Um eine genaue Aussage zu treffen, inwieweit noch Kapazitätsreserven vorliegen oder nicht vorliegen, muss von der produzierten Energiemenge der Energiebedarf der Anlagen abgezogen werden. Der Energieverbrauch der Umkehrosmoseanlage ist den proaqua Daten zu entnehmen. Für den Energieverbrauch der Membrandestillationsanlage des Fraunhofer Instituts liegen keine Werte vor, weshalb hier die Annahmen der Firma juwi aus der obigen Tabelle verwendet werden. Die Berechnungen und die Ergebnisse werden in Anhang I dargestellt. Die gelb markierten Werte sind Strahlungsdaten aus Akutsima und die orange markierten Werte stellen Mittelwerte über die drei zu betrachteten Monate für den Energieverbrauch der proaqua Anlage dar.

Die folgende Abbildung zeigt die Energiebilanz graphisch dargestellt:

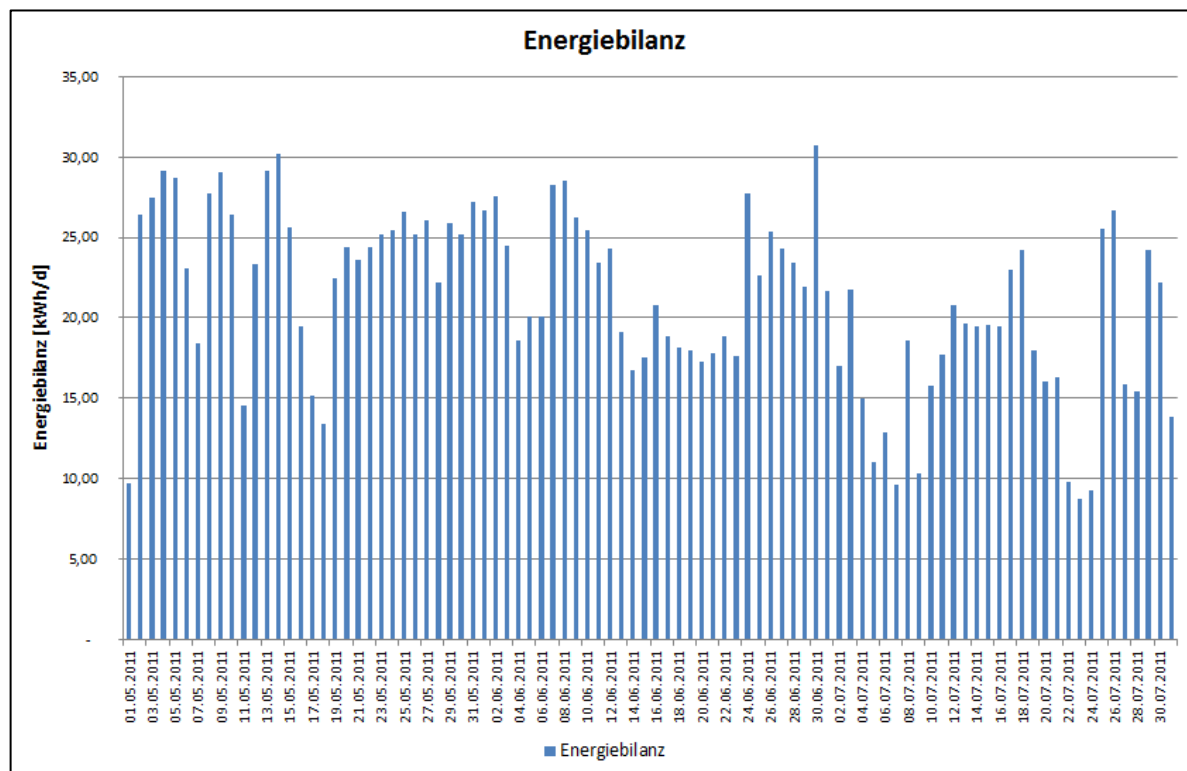


Abbildung 4-7: Energiebilanz der gesamten Anlage

Man erkennt an der Abbildung, dass die Energiebilanz nie negativ wird. Es wird also an jedem Tag mehr Strom durch die Solarpanels erzeugt, als von den Anlagen benötigt wird. Da der Energiebedarf der Anlagen relativ konstant ist, lassen die starken Schwankungen der Bilanz, zwischen 10 und 30 kWh/d, auf einen Zusammenhang zwischen den Werte der Globalstrahlung schließen. Im Mittel hat die Anlage einen Überschuss von 21,8 kWh/d. Die Globalstrahlung liegt in den drei untersuchten Monaten im Mittel bei 5,1 kWh/(m²d). Bei diesem Globalstrahlungswert liegt die Energiebilanz der Anlage bei 8,51 kWh/d. Folglich liegt die gesamte Energiebilanz oberhalb der Bilanz an repräsentativen Tagen. Dies zeigt, dass die Anlage eher großzügig ausgelegt wurde und dass noch einige Kapazitätsreserven vorhanden sind.

4.3. Energiereserven

Bei der Untersuchung der Daten der Photovoltaikanlage ist aufgefallen, dass an einigen Tagen ein Plateau des Batterieladezustands entstanden ist, wie zum Beispiel am 26.05.2011 (siehe folgende Abbildung). Dies geschieht, wenn mehr Strom für die Wasserentsalzungsanlagen produziert wird, als von diesen benötigt wird. Dieser Energieüberschuss ist unter Umständen so hoch, dass der Strom nicht vollständig von den Batterien gespeichert werden kann, da diese nur eine Speicherkapazität von 1500 Ah haben. Dies ist eine Speichergröße, mit dem Standartwert der Spannung von 2,25 V (juwi Holding AG, kein Datum, b), von ca. 33,75 kWh. Somit bleibt Energie übrig, die nicht genutzt wird. Dieser Energieüberschuss oder auch Energiereserve wird im Folgenden näher betrachtet und berechnet.

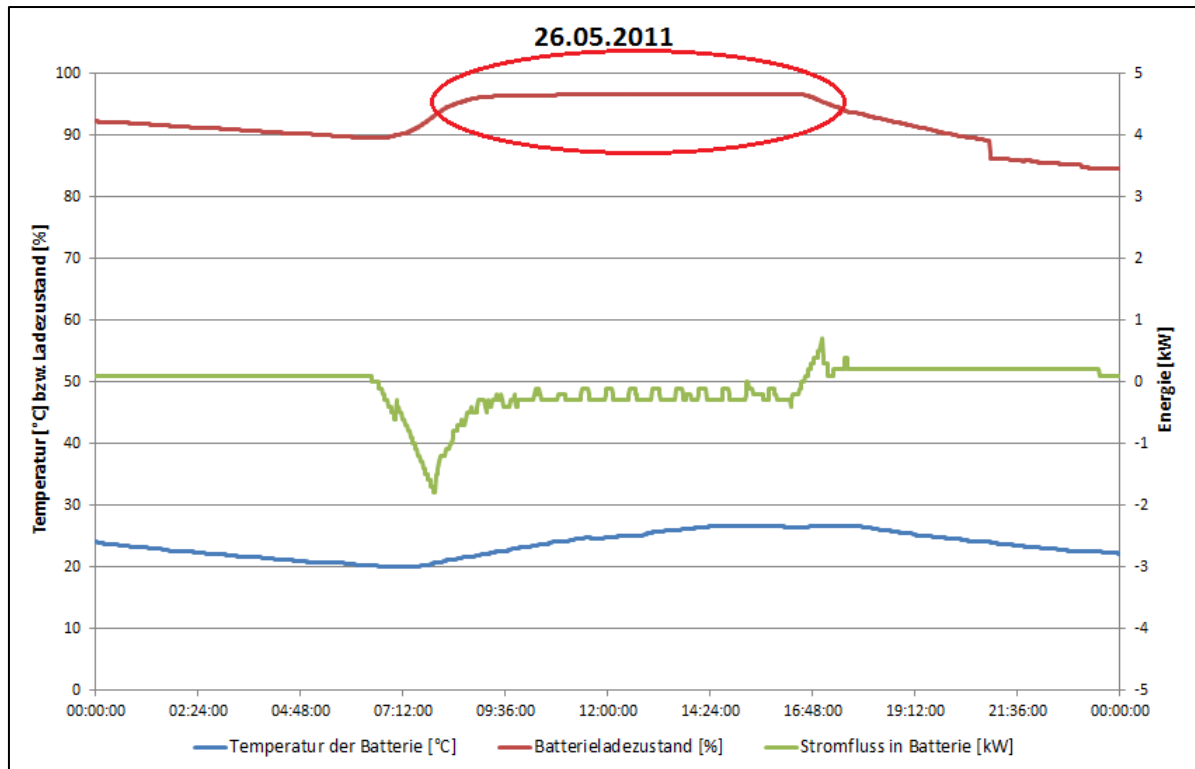


Abbildung 4-8: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage am 26.05.2011

Hierzu werden im Voraus einige Annahmen getätigt. Der Wirkungsgrad der Anlage liegt, wie im Kapitel 4.2 berechnet, bei 8,88% und die Kollektorfläche beträgt 142 m². Außerdem sind die Energieverbräuche der einzelnen Anlagenteile von Bedeutung, diese werden mit den folgenden Werten angenommen.

Anlagenteile	Energieverbräuche [kW]
ProAqua	2,5
Fraunhofer	1,6
Pumpe	1

Tabelle 4-2: Energieverbräuche der Anlagenteile

Um einen Überblick über die Energiereserven zu bekommen, wurde zunächst die genaue Dauer der Plateaus pro Tag festgestellt. Also der Zeitraum indem der Batterieladezustand nicht größer werden kann und sich nicht mehr verändert. Diese werden im Anhang J dargestellt. Daraufhin wird die Globalstrahlung während der Dauer des Plateaus in kWh/m² bestimmt und diese mit der Fläche der Kollektoren multipliziert, um die potentiellen Energiereserven in kWh an diesem Tag zu bestimmen. Die tatsächlichen Energiereserven erhält man, indem man die potentiellen Energiereserven mit dem Wirkungsgrad der Anlage multipliziert. Um nun eine Aussage darüber treffen zu können wie hoch die Energiereserven genau sind, müssen die Energieverbräuche der Anlagenteile von den tatsächlichen Energiereserven abgezogen werden. Hierzu müssen die Energieverbräuche auf die Dauer der Plateaus umgerechnet werden. Die Berechnungen und die Energiereserven werden in Anhang K aufgeführt. Zum besseren Überblick werden diese Daten in der folgenden Graphik dargestellt.

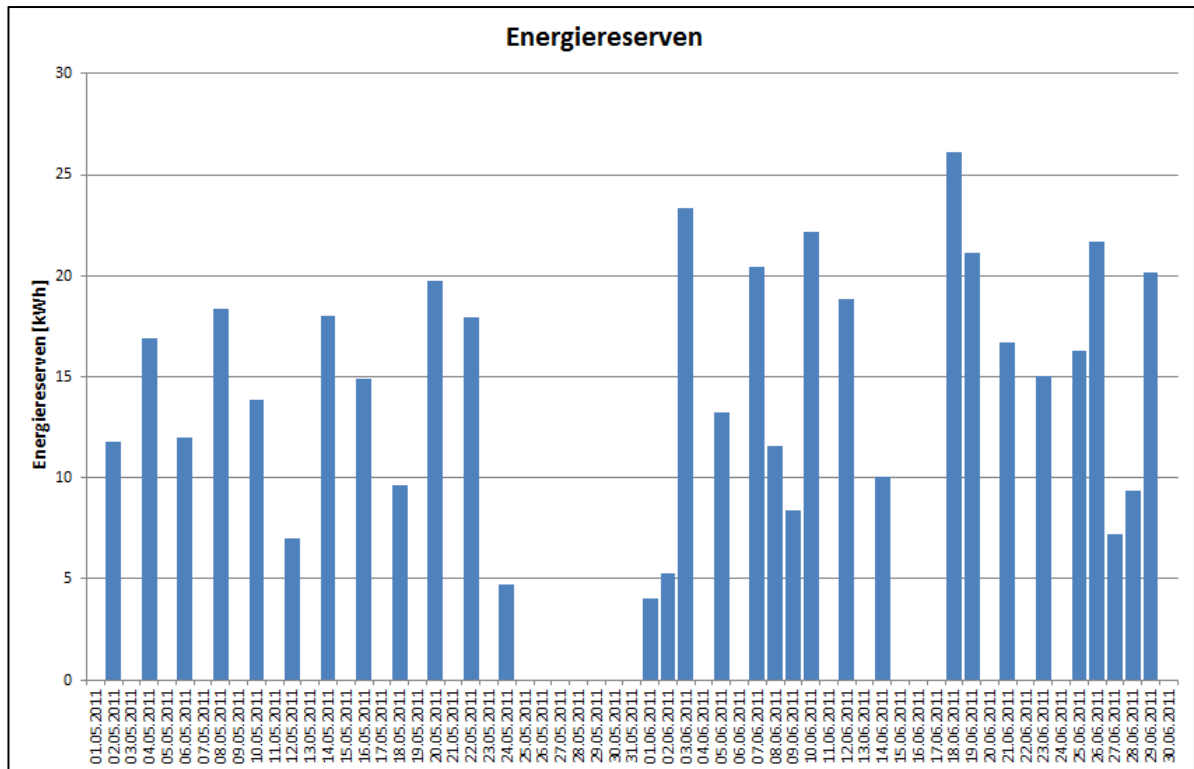


Abbildung 4-9: Energiereserven

Aus dieser Graphik lässt sich erkennen, dass von 61 Tagen in Mai und Juni 31 Tage mit einem Energieüberschuss vorhanden sind, dies ist ca. alle 2 Tage der Fall. Jedoch war die Fraunhofer Anlage vom 25.Mai bis zum 31.Mai nicht in Betrieb, weshalb über diesen Zeitraum keine genaue Aussage getroffen werden können. Maximal erreicht die Anlage eine Energiereserve, wenn ein Energieüberschuss vorhanden ist, von ca. 26 kWh und minimal eine von knapp unter 5 kWh. Im Durchschnitt wird in diesen zwei Monaten einer Energiereserve von 7,5 kWh erreicht. Im Mai liegt die durchschnittliche Globalstrahlungsintensität, gemäß der NASA, bei 5,32 kWh/(m²d), dies ist am 08.Mai der Fall. An diesem Tag liegt die Energiereserve bei 18,33 kWh, damit liegt sie stark über der gemittelten Energiereserve von 7,5 kWh. Im Juni liegt die Globalstrahlung im Mittel bei 4,95 kWh/(m²d). Dies entspricht der Globalstrahlung am 28.06.2011, an dem die Energiereserve bei 9,34 kWh liegt. Somit liegt die Energiereserve an repräsentativen Tagen für den Mai und den Juni über dem durchschnittlichen Wert. Jedoch wurde in Kapitel 3.2 festgestellt, dass die tatsächlich gemessene Globalstrahlung im Jahr 2011 knapp unter den Werten der NASA liegt, somit sind mit ein wenig geringeren Energiereserven als an den repräsentativen Tagen im Durchschnitt an den Tagen im Mai und Juni zu rechnen.

Da die Energiereserven stark von der Intensität der Globalstrahlung abhängig sind und es sich bei diesen zwei Monaten um Wintermonate in Namibia handelt, lässt das vermuten, dass in den Sommermonaten noch höhere Reserven erreicht werden können.

5. Fazit

Das Ziel der Thesis ist es die Auslastung der Photovoltaikanlage zu untersuchen und Kapazitätsreserven bei der Stromproduktion zu identifizieren. Hierzu kann man abschließend anhand der Untersuchungen der Photovoltaikanlage den Schluss ziehen, dass hohe Energieüberschüsse sowie Energiereserven vorhanden sind. Vor allem die Energiebilanz der Anlagen zeigt, dass an jedem Tag des betrachteten Zeitraums, vom 01.05.2011 bis zum 31.07.2011, ein Energieüberschuss vorhanden ist, welcher nicht von den Wasserentsalzungsanlagen benötigt wird und daher von den Batterien gespeichert werden kann. Im Mittel liegt dieser bei 21,8 kWh/d. Bei der Berechnung der Energiereserven der Batterien wurde festgestellt, dass im Durchschnitt am Tag 7,5 kWh überschüssig sind und nicht gespeichert werden. Die Anlage wird daher nicht vollkommen ausgelastet und weist somit Kapazitätsreserven auf.

Die Photovoltaikanlage wird also folglich nicht vollständig ausgelastet und es wird Strom produziert, der nicht gespeichert werden kann, sodass man die Speicherkapazität, durch eine zusätzliche Batterie, erhöhen könnte. Der Energieverbrauch kann dadurch gesteigert werden, beispielsweise um die Produktion der Wasserentsalzungsanlagen zu erhöhen. Durch eine Verlängerung der Betriebslaufzeit der Anlagen und durch das Betreiben der Wasserentsalzungsanlagen nach dem Ladezustand der Batterien, könnte die Permeatproduktion erhöht werden. Die Batterien könnten dann erst ausgeschaltet werden, wenn die Batterien einen bestimmten Ladezustand erreicht haben. Vor allem, da die erzielten Ergebnisse aus der Zeit des namibischen Winters stammen, können mit noch höheren Energiereserven im namibischen Sommer gerechnet werden, die eine zusätzliche Batterie noch effektiver machen würden. Diese Hypothese muss jedoch zunächst in den betreffenden Sommermonaten untersucht werden.

Außerdem ist es von Interesse den genauen Energiebedarf der Membrandestillationsanlage zu erforschen, da hierdurch möglicherweise zusätzliche Kapazitätsreserven identifiziert werden können.

Hinsichtlich der GOR- Werte sind, Optimierungspotentiale vorhanden, da diese für die MD-Module im Durchschnitt 3,55 betragen und die GOR- Werte von anderen Wasserentsalzungsverfahren teilweise darüber liegen. Außerdem ist es wichtig Aufschluss über die Energieeffizienz der gesamten Anlage zu bekommen. Hierzu sollten die Energieverluste sowie der genaue Anlagenaufbau näher untersucht werden. Vor allem der Speicher und die Rohrleitungen sollten auf Wärmeverluste überprüft werden, denn durch das Verhindern von Wärmeverlusten lässt sich der Energieverbrauch der Membrandestillationsanlage reduzieren.

Anhang

A. Datenqualität der Messdaten des Fraunhofer-Instituts ISE

Tabelle A-1: Qualitätsbewertung der Messdaten des Fraunhofer-Instituts ISE

(++ sehr gut (<10 Minuten fehlen), + gut (<30 Minuten fehlen), - ausreichend (>30 Minuten fehlen, aber mit irrelevanten Auswirkungen), -- schlecht (>30 Minuten fehlen, nicht ausreichend)
(Die Korrektheit gibt die Anzahl der fehlerhaften Daten in Minuten an)

Datum	Fraunhofer		Bemerkung	Ersatz für die Globalstrahlung
	Vollständigkeit	Korrektheit		
01.05.2011	++	0		
02.05.2011	++	0		
03.05.2011	++	0		
04.05.2011	++	0		
05.05.2011	+	10		
06.05.2011	+	10		
07.05.2011	++	0		
08.05.2011	++	0		
09.05.2011	++	0		
10.05.2011	++	0		
11.05.2011	++	0		
12.05.2011	++	3		
13.05.2011	++	0		
14.05.2011	++	0		
15.05.2011	++	0		
16.05.2011	++	0		
17.05.2011	++	0		
18.05.2011	++	0		
19.05.2011	++	0		
20.05.2011	++	0		
21.05.2011	++	0		
22.05.2011	++	0		
23.05.2011	++	0		
24.05.2011	++	8		
25.05.2011	--	>30	es fehlen ca. 4 Stunden	von Akutsima
26.05.2011	++	0		
27.05.2011	+	12		
28.05.2011	++	2		
29.05.2011	++	0		
30.05.2011	++	0		
31.05.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
01.06.2011	-	57	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	

Datum	Fraunhofer		Bemerkung	Ersatz für die Globalstrahlung
	Vollständigkeit	Korrektheit		
02.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
03.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
04.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
05.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
06.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
07.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
08.06.2011	-	57	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
09.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
10.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
11.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
12.06.2011	-	57	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
13.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
14.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
15.06.2011	--	>30	Daten nur von 0:00 bis 3:30 Uhr	von Akutsima
16.06.2011	--	>30	Daten nur von 13:00 bis 23:00 Uhr	von Akutsima
17.06.2011	-	55	Daten fehlen von 23:05 bis 0:00 Uhr	
18.06.2011	Datensatz nicht vorhanden			von Akutsima
19.06.2011	--	>30	Daten fehlen bis ca. 8:00 Uhr und ab 23 Uhr	von Akutsima
20.06.2011	++	0		
21.06.2011	++	0		
22.06.2011	++	2		
23.06.2011	++	0		
24.06.2011	++	0		
25.06.2011	++	4		
26.06.2011	++	0		
27.06.2011	++	0		
28.06.2011	++	0		
29.06.2011	++	2		
30.06.2011	++	0		
01.07.2011	++	0		
02.07.2011	++	0		
03.07.2011	++	0		
04.07.2011	++	0		
05.07.2011	++	2		
06.07.2011	++	5		
07.07.2011	++	0		
08.07.2011	++	1		
09.07.2011	++	0		
10.07.2011	++	0		
11.07.2011	++	0		
12.07.2011	++	0		
13.07.2011	++	2		

Datum	Fraunhofer		Bemerkung	Ersatz für die Globalstrahlung
	Vollständigkeit	Korrektheit		
14.07.2011	++	0		
15.07.2011	++	0		
16.07.2011	++	0		
17.07.2011	++	0		
18.07.2011	++	0		
19.07.2011	++	0		
20.07.2011	++	2		
21.07.2011	++	0		
22.07.2011	++	0		
23.07.2011	++	0		
24.07.2011	++	0		
25.07.2011	++	0		
26.07.2011	++	0		
27.07.2011	++	2		
28.07.2011	++	0		
29.07.2011	++	0		
30.07.2011	++	0		
31.07.2011	++	0		

B. Datenqualität der Messdaten der Firma juwi

Tabelle B-2: Qualitätsbewertung der Messdaten der Firma juwi

(+ weniger als 5% fehlen, - mehr als 5% fehlen)

Datum	juwi	
	Vollständigkeit	Bemerkung
01.05.2011	+	
02.05.2011	+	
03.05.2011	+	
04.05.2011	+	
05.05.2011	+	2 mal in einer Minute gemessen
06.05.2011	+	
07.05.2011	+	
08.05.2011	+	
09.05.2011	+	
10.05.2011	+	
11.05.2011	+	
12.05.2011	+	
13.05.2011	+	
14.05.2011	+	
15.05.2011	+	
16.05.2011	+	
17.05.2011	+	2 mal in einer Minute gemessen
18.05.2011	+	
19.05.2011	+	
20.05.2011	+	
21.05.2011	+	
22.05.2011	+	
23.05.2011	+	
24.05.2011	+	
25.05.2011	+	
26.05.2011	+	
27.05.2011	+	
28.05.2011	+	
29.05.2011	+	2 mal in einer Minute gemessen
30.05.2011	+	
31.05.2011	+	
01.06.2011	+	
02.06.2011	+	
03.06.2011	+	
04.06.2011	+	
05.06.2011	+	
06.06.2011	+	
07.06.2011	+	
08.06.2011	+	
09.06.2011	+	2 mal in einer Minute gemessen
10.06.2011	+	
11.06.2011	+	
12.06.2011	+	
13.06.2011	+	
14.06.2011	+	

Datum	juwi	
	Vollständigkeit	Bemerkung
15.06.2011	+	
16.06.2011	+	
17.06.2011	+	
18.06.2011	+	
19.06.2011	+	
20.06.2011	+	
21.06.2011	+	2 mal in einer Minute gemessen
22.06.2011	+	
23.06.2011	+	
24.06.2011	+	
25.06.2011	+	
26.06.2011	+	
27.06.2011	+	
28.06.2011	+	
29.06.2011	-	Werte nur bis 18:03 Uhr
30.06.2011	keine Daten vorhanden	

C. Datenqualität der Messdaten der Firma proaqua GmbH

Tabelle C-3: Qualitätsbewertung der Messdaten der Firma proaqua GmbH
(+wert vorhanden, - Wert nicht vorhanden)

Datum	proaqua Vollständigkeit	Datum	proaqua Vollständigkeit
01.05.2011	+	16.06.2011	-
02.05.2011	+	17.06.2011	-
03.05.2011	+	18.06.2011	-
04.05.2011	+	19.06.2011	-
05.05.2011	+	20.06.2011	-
06.05.2011	+	21.06.2011	-
07.05.2011	-	22.06.2011	-
08.05.2011	+	23.06.2011	-
09.05.2011	+	24.06.2011	+
10.05.2011	+	25.06.2011	-
11.05.2011	+	26.06.2011	-
12.05.2011	+	27.06.2011	-
13.05.2011	+	28.06.2011	-
14.05.2011	+	29.06.2011	-
15.05.2011	+	30.06.2011	+
16.05.2011	+	01.07.2011	+
17.05.2011	+	02.07.2011	+
18.05.2011	+	03.07.2011	+
19.05.2011	+	04.07.2011	+
20.05.2011	+	05.07.2011	+
21.05.2011	+	06.07.2011	+
22.05.2011	+	07.07.2011	+
23.05.2011	+	08.07.2011	+
24.05.2011	+	09.07.2011	+
25.05.2011	+	10.07.2011	+
26.05.2011	-	11.07.2011	+
27.05.2011	+	12.07.2011	+
28.05.2011	+	13.07.2011	+
29.05.2011	+	14.07.2011	+
30.05.2011	+	15.07.2011	+
31.05.2011	+	16.07.2011	+
01.06.2011	+	17.07.2011	+
02.06.2011	+	18.07.2011	+
03.06.2011	+	19.07.2011	+
04.06.2011	+	20.07.2011	+
05.06.2011	+	21.07.2011	+
06.06.2011	+	22.07.2011	+
07.06.2011	+	23.07.2011	+
08.06.2011	+	24.07.2011	+
09.06.2011	+	25.07.2011	+
10.06.2011	+	26.07.2011	+
11.06.2011	+	27.07.2011	+
12.06.2011	+	28.07.2011	+
13.06.2011	+	29.07.2011	+
14.06.2011	+	30.07.2011	+
15.06.2011	-	31.07.2011	+

D. Bestimmung des Deklinationswinkels δ und der Zeitgleichung ZGL

Tabelle D-4: Bestimmung des Deklinationswinkels und der Zeitgleichung

Datum	n [d]	x [°]	ZGL [min]	δ [°]	omegaU	omegaA	omega*U	omega*A
01. Mai	121	116,5376	2,9084	14,8228	1,4829	-1,4829	1,4829	-1,4829
02. Mai	122	117,5232	3,0122	15,1334	1,4809	-1,4809	1,4809	-1,4809
03. Mai	123	118,5088	3,1067	15,4395	1,4790	-1,4790	1,4790	-1,4790
04. Mai	124	119,4944	3,1919	15,7410	1,4771	-1,4771	1,4771	-1,4771
05. Mai	125	120,48	3,2677	16,0379	1,4753	-1,4753	1,4753	-1,4753
06. Mai	126	121,4656	3,3343	16,3300	1,4734	-1,4734	1,4734	-1,4734
07. Mai	127	122,4512	3,3914	16,6173	1,4716	-1,4716	1,4716	-1,4716
08. Mai	128	123,4368	3,4393	16,8996	1,4698	-1,4698	1,4698	-1,4698
09. Mai	129	124,4224	3,4779	17,1770	1,4680	-1,4680	1,4680	-1,4680
10. Mai	130	125,408	3,5072	17,4492	1,4663	-1,4663	1,4663	-1,4663
11. Mai	131	126,3936	3,5272	17,7163	1,4646	-1,4646	1,4646	-1,4646
12. Mai	132	127,3792	3,5381	17,9781	1,4629	-1,4629	1,4629	-1,4629
13. Mai	133	128,3648	3,5399	18,2347	1,4612	-1,4612	1,4612	-1,4612
14. Mai	134	129,3504	3,5327	18,4858	1,4596	-1,4596	1,4596	-1,4596
15. Mai	135	130,336	3,5166	18,7314	1,4580	-1,4580	1,4580	-1,4580
16. Mai	136	131,3216	3,4916	18,9714	1,4565	-1,4565	1,4565	-1,4565
17. Mai	137	132,3072	3,4579	19,2059	1,4549	-1,4549	1,4549	-1,4549
18. Mai	138	133,2928	3,4157	19,4347	1,4534	-1,4534	1,4534	-1,4534
19. Mai	139	134,2784	3,3649	19,6577	1,4520	-1,4520	1,4520	-1,4520
20. Mai	140	135,264	3,3059	19,8748	1,4505	-1,4505	1,4505	-1,4505
21. Mai	141	136,2496	3,2388	20,0861	1,4491	-1,4491	1,4491	-1,4491
22. Mai	142	137,2352	3,1636	20,2915	1,4478	-1,4478	1,4478	-1,4478
23. Mai	143	138,2208	3,0806	20,4908	1,4465	-1,4465	1,4465	-1,4465
24. Mai	144	139,2064	2,9900	20,6840	1,4452	-1,4452	1,4452	-1,4452
25. Mai	145	140,192	2,8920	20,8711	1,4439	-1,4439	1,4439	-1,4439
26. Mai	146	141,1776	2,7868	21,0521	1,4427	-1,4427	1,4427	-1,4427
27. Mai	147	142,1632	2,6745	21,2268	1,4415	-1,4415	1,4415	-1,4415
28. Mai	148	143,1488	2,5554	21,3952	1,4404	-1,4404	1,4404	-1,4404
29. Mai	149	144,1344	2,4298	21,5573	1,4393	-1,4393	1,4393	-1,4393
30. Mai	150	145,12	2,2978	21,7129	1,4383	-1,4383	1,4383	-1,4383
31. Mai	151	146,1056	2,1597	21,8622	1,4372	-1,4372	1,4372	-1,4372
01. Jun	152	147,0912	2,0157	22,0049	1,4363	-1,4363	1,4363	-1,4363
02. Jun	153	148,0768	1,8662	22,1412	1,4353	-1,4353	1,4353	-1,4353
03. Jun	154	149,0624	1,7113	22,2709	1,4345	-1,4345	1,4345	-1,4345
04. Jun	155	150,048	1,5514	22,3940	1,4336	-1,4336	1,4336	-1,4336
05. Jun	156	151,0336	1,3867	22,5104	1,4328	-1,4328	1,4328	-1,4328
06. Jun	157	152,0192	1,2175	22,6202	1,4321	-1,4321	1,4321	-1,4321
07. Jun	158	153,0048	1,0440	22,7233	1,4314	-1,4314	1,4314	-1,4314
08. Jun	159	153,9904	0,8667	22,8196	1,4307	-1,4307	1,4307	-1,4307
09. Jun	160	154,976	0,6857	22,9092	1,4301	-1,4301	1,4301	-1,4301
10. Jun	161	155,9616	0,5013	22,9920	1,4295	-1,4295	1,4295	-1,4295
11. Jun	162	156,9472	0,3140	23,0680	1,4290	-1,4290	1,4290	-1,4290
12. Jun	163	157,9328	0,1239	23,1371	1,4285	-1,4285	1,4285	-1,4285
13. Jun	164	158,9184	-0,0686	23,1994	1,4281	-1,4281	1,4281	-1,4281
14. Jun	165	159,904	-0,2632	23,2548	1,4277	-1,4277	1,4277	-1,4277
15. Jun	166	160,8896	-0,4596	23,3034	1,4274	-1,4274	1,4274	-1,4274
16. Jun	167	161,8752	-0,6575	23,3450	1,4271	-1,4271	1,4271	-1,4271
17. Jun	168	162,8608	-0,8565	23,3797	1,4268	-1,4268	1,4268	-1,4268
18. Jun	169	163,8464	-1,0563	23,4075	1,4266	-1,4266	1,4266	-1,4266

Datum	n [d]	x [°]	ZGL [min]	δ [°]	omegaU	omegaA	omega*U	omega*A
19. Jun	170	164,832	-1,2567	23,4283	1,4265	-1,4265	1,4265	-1,4265
20. Jun	171	165,8176	-1,4572	23,4422	1,4264	-1,4264	1,4264	-1,4264
21. Jun	172	166,8032	-1,6576	23,4491	1,4263	-1,4263	1,4263	-1,4263
22. Jun	173	167,7888	-1,8575	23,4491	1,4263	-1,4263	1,4263	-1,4263
23. Jun	174	168,7744	-2,0567	23,4422	1,4264	-1,4264	1,4264	-1,4264
24. Jun	175	169,76	-2,2547	23,4283	1,4265	-1,4265	1,4265	-1,4265
25. Jun	176	170,7456	-2,4513	23,4075	1,4266	-1,4266	1,4266	-1,4266
26. Jun	177	171,7312	-2,6462	23,3797	1,4268	-1,4268	1,4268	-1,4268
27. Jun	178	172,7168	-2,8390	23,3450	1,4271	-1,4271	1,4271	-1,4271
28. Jun	179	173,7024	-3,0294	23,3034	1,4274	-1,4274	1,4274	-1,4274
29. Jun	180	174,688	-3,2172	23,2548	1,4277	-1,4277	1,4277	-1,4277
30. Jun	181	175,6736	-3,4019	23,1994	1,4281	-1,4281	1,4281	-1,4281
01. Jul	182	176,6592	-3,5833	23,1371	1,4285	-1,4285	1,4285	-1,4285
02. Jul	183	177,6448	-3,7612	23,0680	1,4290	-1,4290	1,4290	-1,4290
03. Jul	184	178,6304	-3,9351	22,9920	1,4295	-1,4295	1,4295	-1,4295
04. Jul	185	179,616	-4,1048	22,9092	1,4301	-1,4301	1,4301	-1,4301
05. Jul	186	180,6016	-4,2700	22,8196	1,4307	-1,4307	1,4307	-1,4307
06. Jul	187	181,5872	-4,4304	22,7233	1,4314	-1,4314	1,4314	-1,4314
07. Jul	188	182,5728	-4,5857	22,6202	1,4321	-1,4321	1,4321	-1,4321
08. Jul	189	183,5584	-4,7357	22,5104	1,4328	-1,4328	1,4328	-1,4328
09. Jul	190	184,544	-4,8801	22,3940	1,4336	-1,4336	1,4336	-1,4336
10. Jul	191	185,5296	-5,0187	22,2709	1,4345	-1,4345	1,4345	-1,4345
11. Jul	192	186,5152	-5,1510	22,1412	1,4353	-1,4353	1,4353	-1,4353
12. Jul	193	187,5008	-5,2770	22,0049	1,4363	-1,4363	1,4363	-1,4363
13. Jul	194	188,4864	-5,3964	21,8622	1,4372	-1,4372	1,4372	-1,4372
14. Jul	195	189,472	-5,5089	21,7129	1,4383	-1,4383	1,4383	-1,4383
15. Jul	196	190,4576	-5,6143	21,5573	1,4393	-1,4393	1,4393	-1,4393
16. Jul	197	191,4432	-5,7124	21,3952	1,4404	-1,4404	1,4404	-1,4404
17. Jul	198	192,4288	-5,8030	21,2268	1,4415	-1,4415	1,4415	-1,4415
18. Jul	199	193,4144	-5,8858	21,0521	1,4427	-1,4427	1,4427	-1,4427
19. Jul	200	194,4	-5,9607	20,8711	1,4439	-1,4439	1,4439	-1,4439
20. Jul	201	195,3856	-6,0275	20,6840	1,4452	-1,4452	1,4452	-1,4452
21. Jul	202	196,3712	-6,0859	20,4908	1,4465	-1,4465	1,4465	-1,4465
22. Jul	203	197,3568	-6,1359	20,2915	1,4478	-1,4478	1,4478	-1,4478
23. Jul	204	198,3424	-6,1773	20,0861	1,4491	-1,4491	1,4491	-1,4491
24. Jul	205	199,328	-6,2098	19,8748	1,4505	-1,4505	1,4505	-1,4505
25. Jul	206	200,3136	-6,2335	19,6577	1,4520	-1,4520	1,4520	-1,4520
26. Jul	207	201,2992	-6,2481	19,4347	1,4534	-1,4534	1,4534	-1,4534
27. Jul	208	202,2848	-6,2535	19,2059	1,4549	-1,4549	1,4549	-1,4549
28. Jul	209	203,2704	-6,2496	18,9714	1,4565	-1,4565	1,4565	-1,4565
29. Jul	210	204,256	-6,2363	18,7314	1,4580	-1,4580	1,4580	-1,4580
30. Jul	211	205,2416	-6,2135	18,4858	1,4596	-1,4596	1,4596	-1,4596
31. Jul	212	206,2272	-6,1812	18,2347	1,4612	-1,4612	1,4612	-1,4612

E. Globalstrahlung am Standort Amarika

Tabelle E-5: Globalstrahlungswerte auf die geneigte und die horizontale Fläche

Datum	Idm [Wh/(m²d)]	Idm[kWh/(m²d)]	Id [kWh/(m²d)]	Bemerkung
01.05.2011	4664,47681	4,66447681	4,12852366	
02.05.2011	6003,33331	6,00333331	5,30366843	
03.05.2011	6167,29114	6,16729114	5,43859905	
04.05.2011	6222,25844	6,22225844	5,47708229	
05.05.2011	6182,61153	6,18261153	5,43238547	
06.05.2011	5812,71083	5,81271083	5,09722563	
07.05.2011	5496,33453	5,49633453	4,81221613	
08.05.2011	6110,18911	6,11018911	5,34038502	
09.05.2011	6216,49169	6,21649169	5,42412089	
10.05.2011	5761,79442	5,76179442	5,01879197	
11.05.2011	5054,06158	5,05406158	4,39501505	
12.05.2011	5756,68464	5,75668464	4,99779516	
13.05.2011	6303,17936	6,30317936	5,46350941	
14.05.2011	6307,01678	6,30701678	5,4580821	
15.05.2011	6180,05986	6,18005986	5,33980512	
16.05.2011	5768,10781	5,76810781	4,97630163	
17.05.2011	5344,26825	5,34426825	4,60367747	
18.05.2011	5282,29828	5,28229828	4,54356528	
19.05.2011	5763,46756	5,76346756	4,95027412	
20.05.2011	6081,30731	6,08130731	5,21589278	
21.05.2011	6017,42192	6,01742192	5,1538525	
22.05.2011	5920,08739	5,92008739	5,06368416	
23.05.2011	5902,64167	5,90264167	5,04217491	
24.05.2011	5924,10556	5,92410556	5,0537345	
25.05.2011	6017,6523	6,0176523	5,10188287	Ersatz durch Akutsima
26.05.2011	6040,56217	6,04056217	5,14071491	
27.05.2011	5972,41935	5,97241935	5,07931449	
28.05.2011	5744,40942	5,74440942	4,90829603	
29.05.2011	5958,72078	5,95872078	5,05395425	
30.05.2011	6144,86944	6,14486944	5,20635968	
31.05.2011	6148,68333	6,14868333	5,20418691	
01.06.2011	6101,58333	6,10158333	5,15934654	
02.06.2011	6109,54722	6,10954722	5,16133717	
03.06.2011	6087,10833	6,08710833	5,13773919	
04.06.2011	5698,32222	5,69832222	4,80561864	
05.06.2011	5575,95	5,57595	4,69861291	
06.06.2011	5573,375	5,573375	4,69286775	
07.06.2011	6151,03611	6,15103611	5,17541356	
08.06.2011	6252,85556	6,25285556	5,25759013	
09.06.2011	6067,13889	6,06713889	5,09830009	
10.06.2011	5928,95	5,92895	4,97936762	
11.06.2011	5843,07778	5,84307778	4,90457333	
12.06.2011	5833,37222	5,83337222	4,89340825	
13.06.2011	5661,2	5,6612	4,7476087	
14.06.2011	5309,23056	5,30923056	4,45055563	
15.06.2011	5428,111891	5,428111891	4,52282663	Ersatz durch Akutsima
16.06.2011	5690,42024	5,69042024	4,17605511	Ersatz durch Akutsima
17.06.2011	5536,36389	5,53636389	4,63653225	
18.06.2011	5479,578275	5,479578275	4,001028293	Ersatz durch Akutsima

Datum	Idm [Wh/(m²d)]	Idm[kWh/(m²d)]	Id [kWh/(m²d)]	Bemerkung
19.06.2011	5464,35015	5,46435015	3,999323021	Ersatz durch Akutsima
20.06.2011	5408,96389	5,40896389	4,52824012	
21.06.2011	5448,36389	5,44836389	4,56098132	
22.06.2011	5532,39722	5,53239722	4,63132803	
23.06.2011	5437,86389	5,43786389	4,55243445	
24.06.2011	5548,72778	5,54872778	4,64559169	
25.06.2011	5837,00833	5,83700833	4,88739615	
26.06.2011	6053,03333	6,05303333	5,06970489	
27.06.2011	5970,34167	5,97034167	5,00161506	
28.06.2011	5901,28889	5,90128889	4,945342	
29.06.2011	5782,24167	5,78224167	4,84706548	
30.06.2011	5784,14722	5,78414722	4,85055955	
01.07.2011	5863,96111	5,86396111	4,91966973	
02.07.2011	5647,6	5,6476	4,74049288	
03.07.2011	5870,42778	5,87042778	4,9300621	
04.07.2011	5329,79444	5,32979444	4,47855812	
05.07.2011	5094,31111	5,09431111	4,28368196	
06.07.2011	5081,71389	5,08171389	4,27501314	
07.07.2011	4978,39444	4,97839444	4,19188494	
08.07.2011	5617,45556	5,61745556	4,73358384	
09.07.2011	4956,08056	4,95608056	4,17952894	
10.07.2011	5391,93056	5,39193056	4,55098408	
11.07.2011	5544,03611	5,54403611	4,68345249	
12.07.2011	5795,53056	5,79553056	4,90055596	
13.07.2011	5704,6	5,7046	4,82831901	
14.07.2011	5685,60278	5,68560278	4,8172371	
15.07.2011	5691,91389	5,69191389	4,82765908	
16.07.2011	5686,91111	5,68691111	4,82869815	
17.07.2011	5971	5,971	5,07568	
18.07.2011	6069,05278	6,06905278	5,16496135	
19.07.2011	5566,06667	5,56606667	4,7425425	
20.07.2011	5410,66111	5,41066111	4,61592985	
21.07.2011	5430,85556	5,43085556	4,63916431	
22.07.2011	4914,73056	4,91473056	4,20376284	
23.07.2011	4749,27778	4,74927778	4,06781108	
24.07.2011	4873,875	4,873875	4,18028693	
25.07.2011	6409,83611	6,40983611	5,50544365	
26.07.2011	6264,94722	6,26494722	5,3887901	
27.07.2011	5315,96111	5,31596111	4,57847263	
28.07.2011	5363,24722	5,36324722	4,62690119	
29.07.2011	6149,18056	6,14918056	5,31312423	
30.07.2011	5908,4	5,9084	5,11299505	
31.07.2011	5240,68056	5,24068056	4,54244098	

Tabelle E-6: Monatsmittelwerte der Globalstrahlung auf die geneigte und die horizontale Fläche

Monat	Monatsmittelwert Idm [Wh/(m²d)]	Monatsmittelwert Id [Wh/(m²d)]
Mai	5,879661825	5,078228125
Juni	5,773994039	4,826609390
Juli	5,534775359	4,707344781

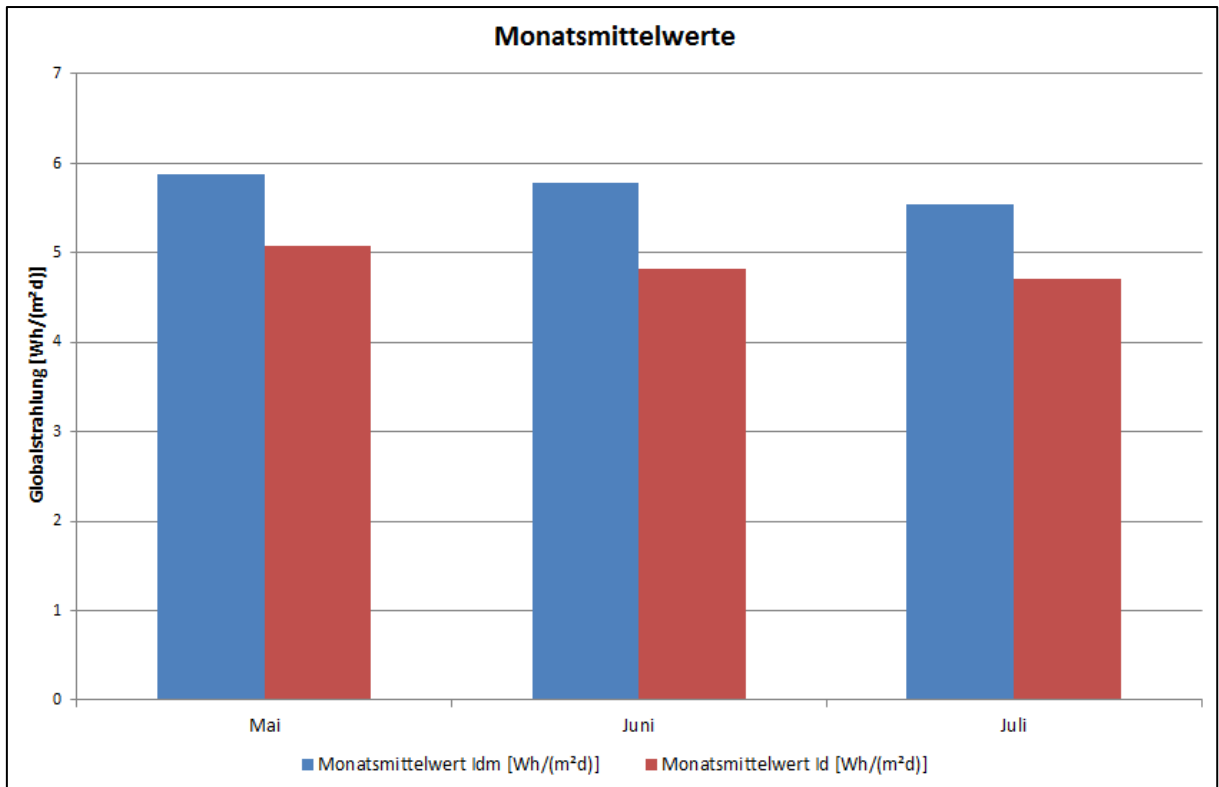


Abbildung E-1: Monatsmittelwerte der Globalstrahlung auf die geneigte und die horizontale Fläche

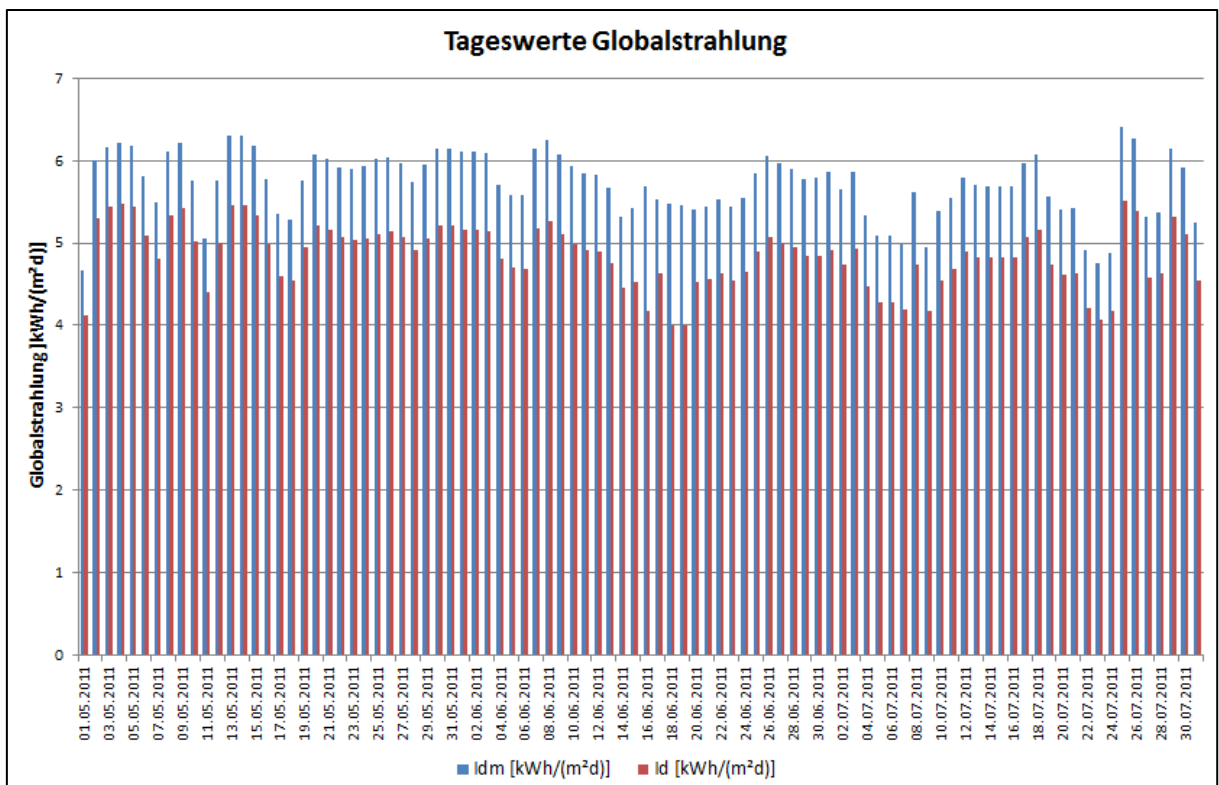


Abbildung E-2: Tageswerte der Globalstrahlung auf die geneigte und horizontale Fläche

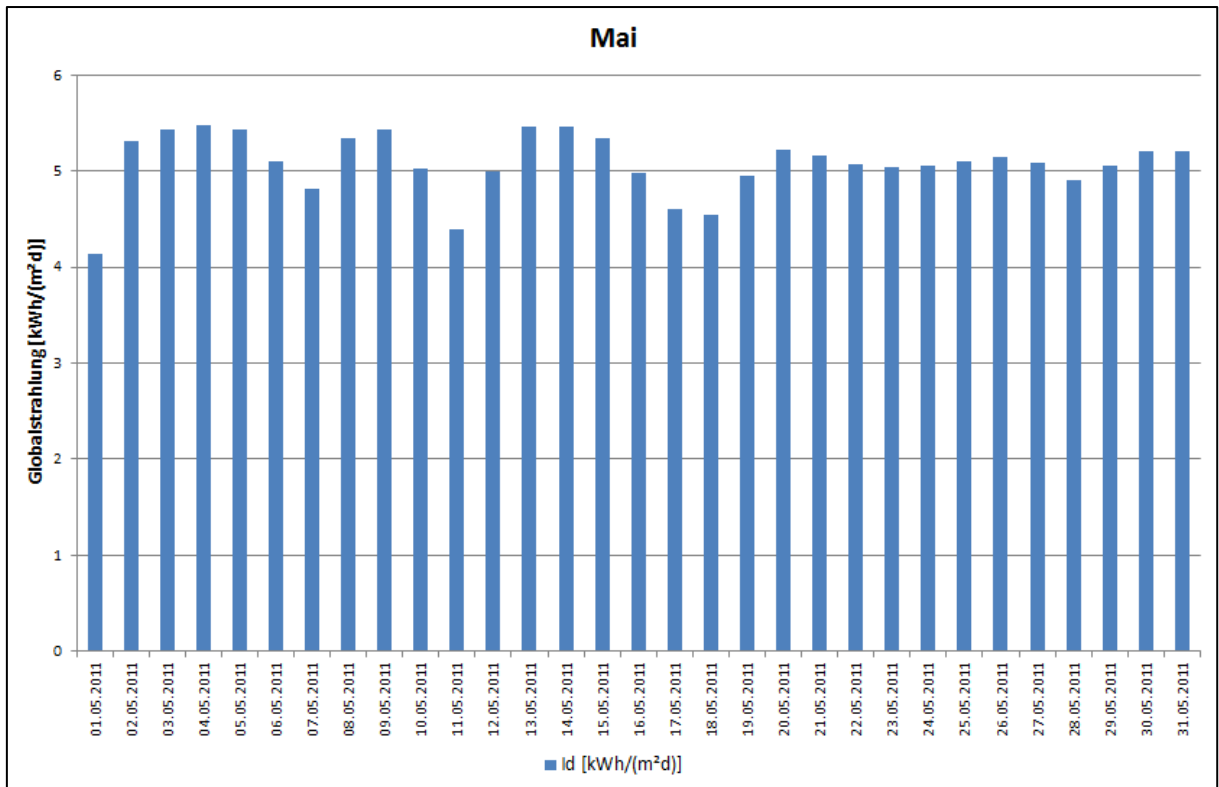


Abbildung E-3: Globalstrahlung im Mai 2011 auf die horizontale Fläche

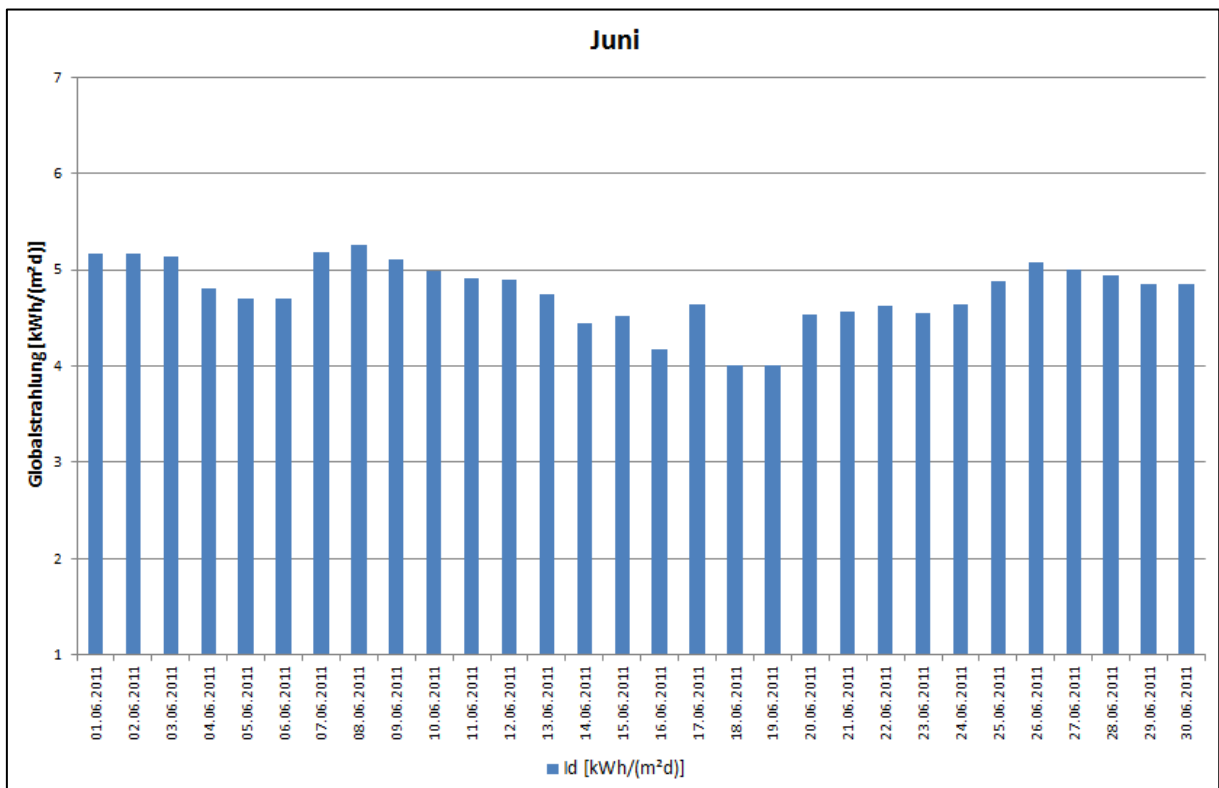


Abbildung E-4: Globalstrahlung im Juni 2011 auf die horizontale Fläche

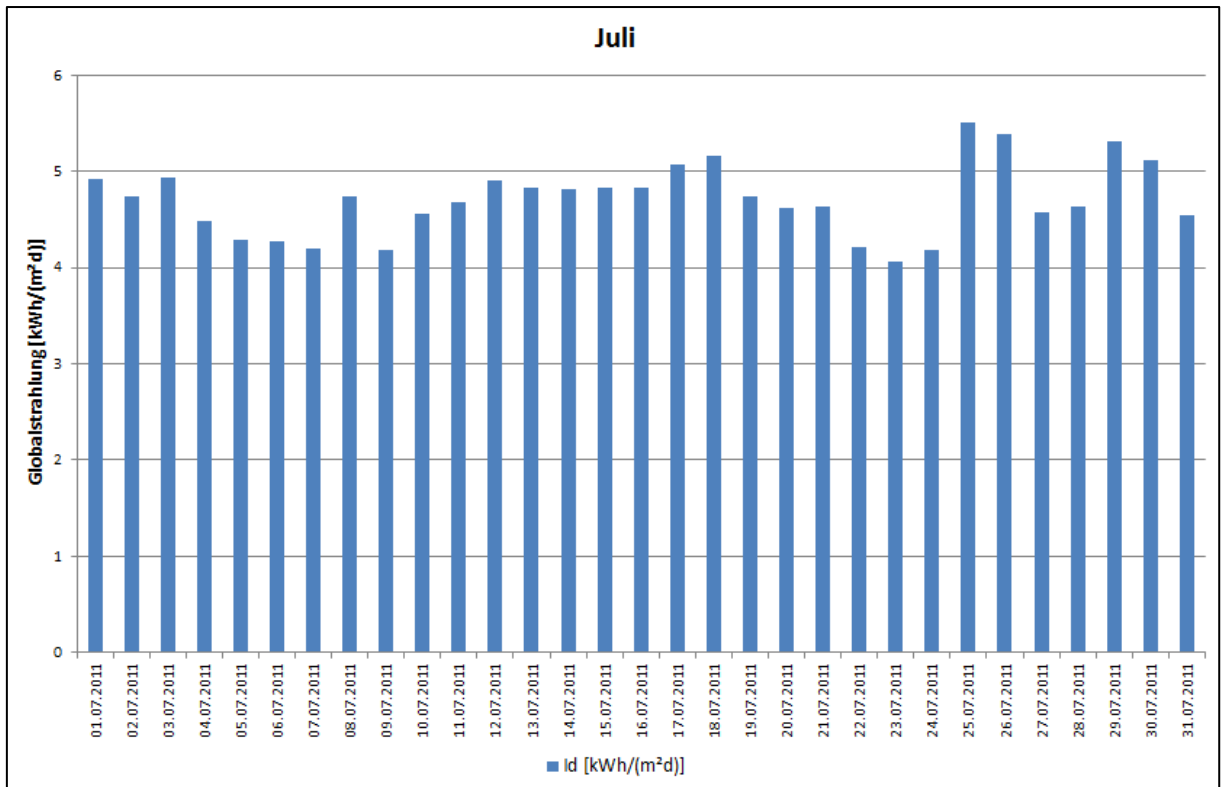


Abbildung E-5: Globalstrahlung im Juli 2011 auf die horizontale Fläche

F. Energieaufnahme der MD- Module

Tabelle F-7: Energieaufnahme der MD- Module im Verhältnis zur Globalstrahlung auf die geneigte Fläche

(Gelb: Feed- Volumenstrom und Destillatproduktionsrate zu gering)

Datum	Energieaufnahme der MD- Module pro Tag [kWh/m²d]	Idm [kWh/m²d]	Verhältnis [%]
01.05.2011	1,175198251	4,66447681	25,19464238
02.05.2011	1,531672579	6,00333331	25,51370214
03.05.2011	1,698599524	6,16729114	27,54206807
04.05.2011	1,687942414	6,22225844	27,12748804
05.05.2011	1,682685031	6,18261153	27,21641207
06.05.2011	1,230627105	5,81271083	21,1713113
07.05.2011	1,427909925	5,49633453	25,97931253
08.05.2011	1,586442197	6,11018911	25,96388047
09.05.2011	1,739910056	6,21649169	27,9886171
10.05.2011	1,598230867	5,76179442	27,73842228
11.05.2011	1,264709972	5,05406158	25,02363598
12.05.2011	1,426505216	5,75668464	24,7799785
13.05.2011	1,59219021	6,30317936	25,2601127
14.05.2011	1,787762885	6,30701678	28,34561802
15.05.2011	1,76228329	6,18005986	28,51563464
16.05.2011	1,608899252	5,76810781	27,89301631
17.05.2011	1,226487411	5,34426825	22,94958549
18.05.2011	1,230870105	5,28229828	23,301791
19.05.2011	1,366589123	5,76346756	23,71123128
20.05.2011	1,558692097	6,08130731	25,63087207
21.05.2011	1,596144391	6,01742192	26,52538599
22.05.2011	1,514151254	5,92008739	25,57650173
23.05.2011	-	5,90264167	-
24.05.2011	-	5,92410556	-
25.05.2011	-	6,0176523	-
26.05.2011	1,092501481	6,04056217	18,08608952
27.05.2011	1,378745562	5,97241935	23,08521021
28.05.2011	1,384667445	5,74440942	24,10460927
29.05.2011	1,453656443	5,95872078	24,39544487
30.05.2011	1,491355022	6,14486944	24,26992203
31.05.2011	1,399434996	6,14868333	22,75991332
01.06.2011	1,251775461	6,10158333	20,51558412
02.06.2011	1,20871907	6,10954722	19,78410227
03.06.2011	1,2211227	6,08710833	20,06080119
04.06.2011	1,19691619	5,69832222	21,00471233
05.06.2011	1,2176764	5,57595	21,83800787
06.06.2011	1,24372389	5,573375	22,3154532
07.06.2011	1,29948003	6,15103611	21,12619739
08.06.2011	1,03644493	6,25285556	16,57554569
09.06.2011	1,10267204	6,06713889	18,17449806
10.06.2011	1,20520833	5,92895	20,32751718
11.06.2011	1,2249192	5,84307778	20,96359566
12.06.2011	0,82211828	5,83337222	14,09336228
13.06.2011	1,50922577	5,6612	26,65911415
14.06.2011	1,12530021	5,30923056	21,19516561
15.06.2011	-	5,428111891	-

Datum	Energieaufnahme der MD- Module pro Tag [kWh/m²d]	Idm [kWh/m²d]	Verhältnis [%]
16.06.2011	-	5,69042024	-
17.06.2011	0,264457748	5,53636389	4,776740709
18.06.2011	-	5,479578275	-
19.06.2011	-	5,46435015	-
20.06.2011	1,09912647	5,40896389	20,32046234
21.06.2011	1,11645484	5,44836389	20,49156155
22.06.2011	1,19135295	5,53239722	21,53411808
23.06.2011	1,2096848	5,43786389	22,24558806
24.06.2011	1,23636282	5,54872778	22,28191522
25.06.2011	0,24516992	5,83700833	4,200266773
26.06.2011	0,81315745	6,05303333	13,43388357
27.06.2011	0,89456681	5,97034167	14,98351115
28.06.2011	1,11250149	5,90128889	18,85183916
29.06.2011	0,42496837	5,78224167	7,349543521
30.06.2011	-	5,78414722	-
01.07.2011	-	5,86396111	-
02.07.2011	-	5,6476	-
03.07.2011	-	5,87042778	-
04.07.2011	-	5,32979444	-
05.07.2011	-	5,09431111	-
06.07.2011	-	5,08171389	-
07.07.2011	0,3586362	4,97839444	7,203852654
08.07.2011	0,92747976	5,61745556	16,51067374
09.07.2011	0,79760339	4,95608056	16,09343069
10.07.2011	0,90367994	5,39193056	16,75985864
11.07.2011	0,94303077	5,54403611	17,00982373
12.07.2011	1,02023496	5,79553056	17,60382332
13.07.2011	0,96255625	5,7046	16,87333468
14.07.2011	1,04652329	5,68560278	18,4065495
15.07.2011	0,9873715	5,69191389	17,34691563
16.07.2011	1,0615361	5,68691111	18,66630372
17.07.2011	1,15706207	5,971	19,3780283
18.07.2011	1,10102245	6,06905278	18,14158634
19.07.2011	1,02656692	5,56606667	18,44330981
20.07.2011	1,05359599	5,41066111	19,47259251
21.07.2011	1,09168177	5,43085556	20,10146943
22.07.2011	0,83566982	4,91473056	17,00336997
23.07.2011	0,85589872	4,74927778	18,02166055
24.07.2011	0,9453202	4,873875	19,39565951
25.07.2011	1,16781778	6,40983611	18,21915194
26.07.2011	1,09514501	6,26494722	17,48051454
27.07.2011	0,78140456	5,31596111	14,69921513
28.07.2011	0,88713981	5,36324722	16,54109486
29.07.2011	1,01360257	6,14918056	16,48353891
30.07.2011	1,06595748	5,9084	18,04138989
31.07.2011	0,76702238	5,24068056	14,6359308

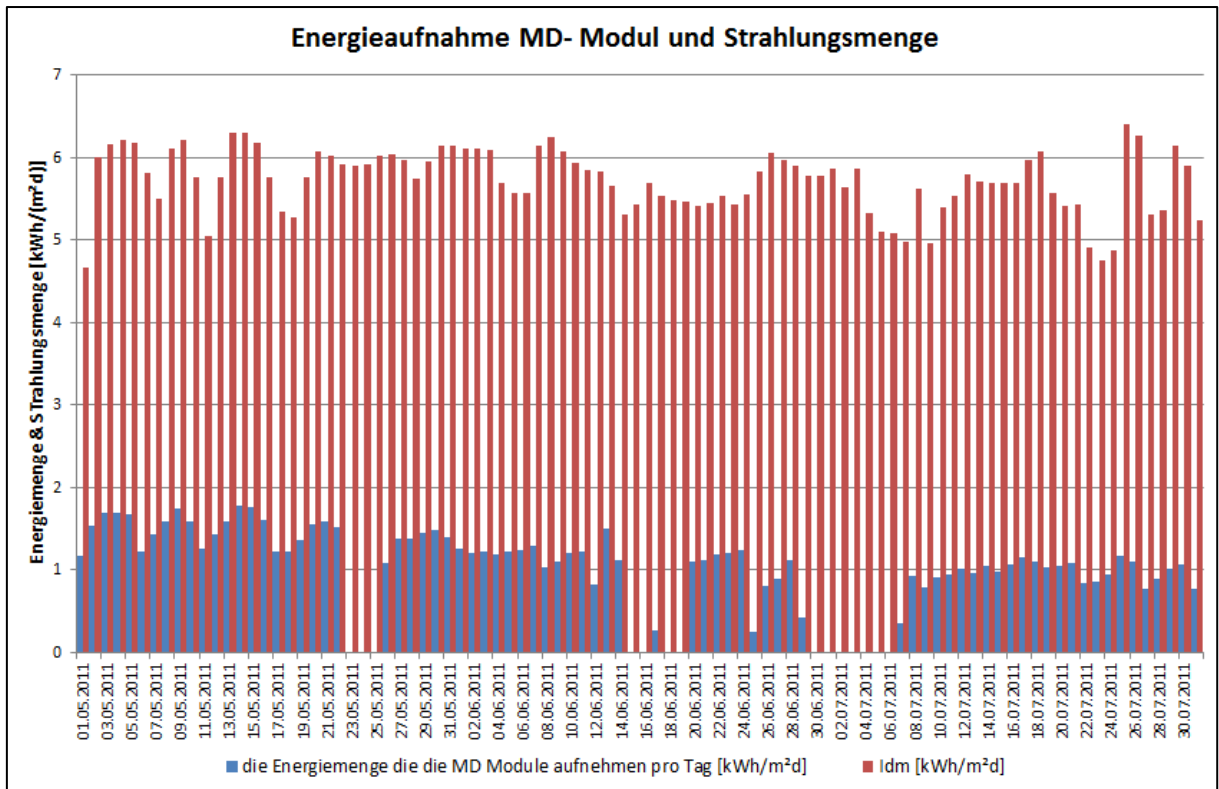


Abbildung F-6: Energieaufnahme der MD- Module im Verhältnis zur Globalstrahlung

G. GOR- Werte

Tabelle G-8: GOR- Werte für die MD- Module und für das gesamt System

Datum	GOR _{MD}	GOR _{Id}	GOR _{Idm}
01.05.2011	3,30591173	0,94103898	0,83291264
02.05.2011	3,41406589	0,98596494	0,8710546
03.05.2011	3,41761684	1,06740031	0,94128236
04.05.2011	3,47652841	1,07140617	0,94309483
05.05.2011	3,49245444	1,0817901	0,95052079
06.05.2011	3,40642051	0,82241472	0,72118389
07.05.2011	3,48951302	1,03542945	0,90655149
08.05.2011	3,51006998	1,04271941	0,91135037
09.05.2011	3,47805541	1,11566532	0,97345961
10.05.2011	3,43768133	1,09472727	0,95355856
11.05.2011	3,4884323	1,00383163	0,8729326
12.05.2011	3,48196408	0,99384624	0,86282995
13.05.2011	3,54240217	1,03233611	0,89481478
14.05.2011	3,50157426	1,14692018	0,99254286
15.05.2011	3,49637407	1,15390009	0,99701326
16.05.2011	3,48153768	1,12562376	0,97110587
17.05.2011	3,51321405	0,93597191	0,80626806
18.05.2011	3,4803865	0,9428507	0,81099239
19.05.2011	3,47069518	0,95813165	0,82294456
20.05.2011	3,45151845	1,03143503	0,88465428
21.05.2011	3,46479326	1,07304397	0,91904979
22.05.2011	3,45795345	1,03400299	0,88442353
23.05.2011	-	-	-
24.05.2011	-	-	-
25.05.2011	-	-	-
26.05.2011	3,51646805	0,74731757	0,63599156
27.05.2011	3,5107829	0,95297827	0,81047161
28.05.2011	3,55309821	1,00235589	0,85646044
29.05.2011	3,56362285	1,02499608	0,86936165
30.05.2011	3,49831515	1,00208787	0,84903836
31.05.2011	3,48098977	0,93605764	0,79227026
01.06.2011	3,51109449	0,85187182	0,72032154
02.06.2011	3,48188189	0,81541215	0,68885907
03.06.2011	3,46801242	0,82426697	0,69571108
04.06.2011	3,50214686	0,87226569	0,73561587
05.06.2011	3,5509749	0,92025847	0,77546218
06.06.2011	3,57483631	0,94741841	0,79774092
07.06.2011	3,4880702	0,87580973	0,7368966
08.06.2011	3,38893977	0,66807213	0,56173526
09.06.2011	3,38766616	0,73269221	0,61569132
10.06.2011	3,43969595	0,83254552	0,69920479
11.06.2011	3,43628745	0,8582142	0,72036941
12.06.2011	3,19792017	0,53726738	0,45069447
13.06.2011	3,36072195	1,06834587	0,8959387
14.06.2011	3,39099049	0,85739459	0,71872605
15.06.2011	-	-	-
16.06.2011	-	-	-
17.06.2011	1,64440914	0,09379353	0,07854916
18.06.2011	-	-	-
19.06.2011	-	-	-

Datum	GOR _{MD}	GOR _{Id}	GOR _{Idm}
20.06.2011	3,40916299	0,82749615	0,69275768
21.06.2011	3,40039249	0,83236137	0,69679352
22.06.2011	3,37512492	0,86820994	0,72680339
23.06.2011	3,35835173	0,89239001	0,74708509
24.06.2011	3,37647551	0,89860433	0,75234341
25.06.2011	2,69609262	0,13524601	0,11324308
26.06.2011	3,28254081	0,52650451	0,44097271
27.06.2011	3,30644741	0,5913766	0,49542192
28.06.2011	3,32519947	0,74803509	0,62686126
29.06.2011	2,84637466	0,24955702	0,20919554
30.06.2011	-	-	-
01.07.2011	-	-	-
02.07.2011	-	-	-
03.07.2011	-	-	-
04.07.2011	-	-	-
05.07.2011	-	-	-
06.07.2011	-	-	-
07.07.2011	4,43364713	0,37932013	0,3193934
08.07.2011	3,92951108	0,76993291	0,64878875
09.07.2011	3,8147116	0,72798321	0,61391797
10.07.2011	3,79941422	0,75444219	0,63677645
11.07.2011	3,79883841	0,7649104	0,64617572
12.07.2011	3,80574513	0,79230893	0,66995665
13.07.2011	3,82327337	0,76219398	0,64511371
14.07.2011	3,81863517	0,82958147	0,70287897
15.07.2011	3,84353605	0,78609485	0,66673496
16.07.2011	3,79241207	0,83372002	0,70790315
17.07.2011	3,79010809	0,86400055	0,73444822
18.07.2011	3,87351336	0,82572257	0,70271677
19.07.2011	3,9071032	0,8457284	0,72059915
20.07.2011	3,99080607	0,91091013	0,77711134
21.07.2011	4,01390155	0,9445458	0,80685319
22.07.2011	3,94734705	0,78469669	0,67118202
23.07.2011	3,96790154	0,83487699	0,71508175
24.07.2011	3,92458722	0,88749687	0,76119958
25.07.2011	3,84891878	0,8164348	0,70124036
26.07.2011	3,91716951	0,79607269	0,68474139
27.07.2011	3,92772016	0,67034111	0,57734404
28.07.2011	3,78207591	0,72515707	0,62559676
29.07.2011	3,90484519	0,74494044	0,64365668
30.07.2011	3,92668597	0,8186357	0,70842873
31.07.2011	3,88668137	0,65629286	0,568852

H. Betriebsdaten der Photovoltaikanlage

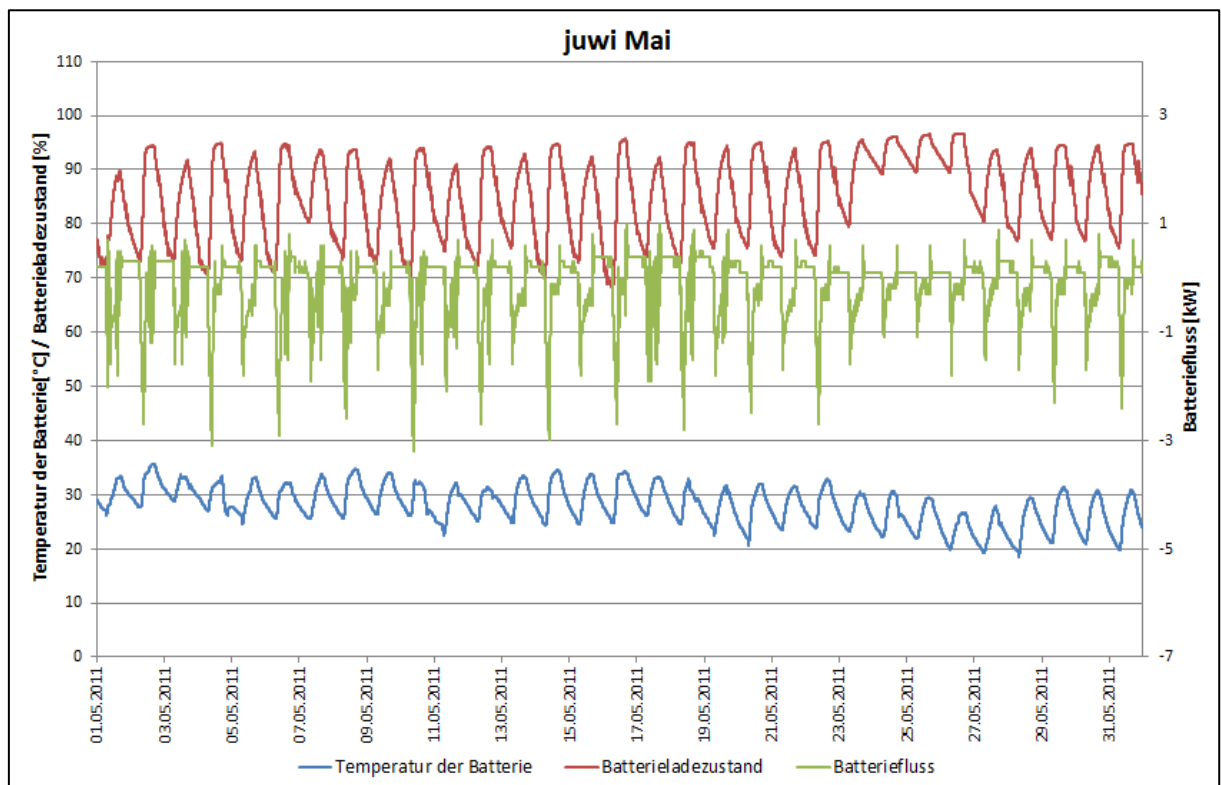


Abbildung H-7: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage im Mai 2011

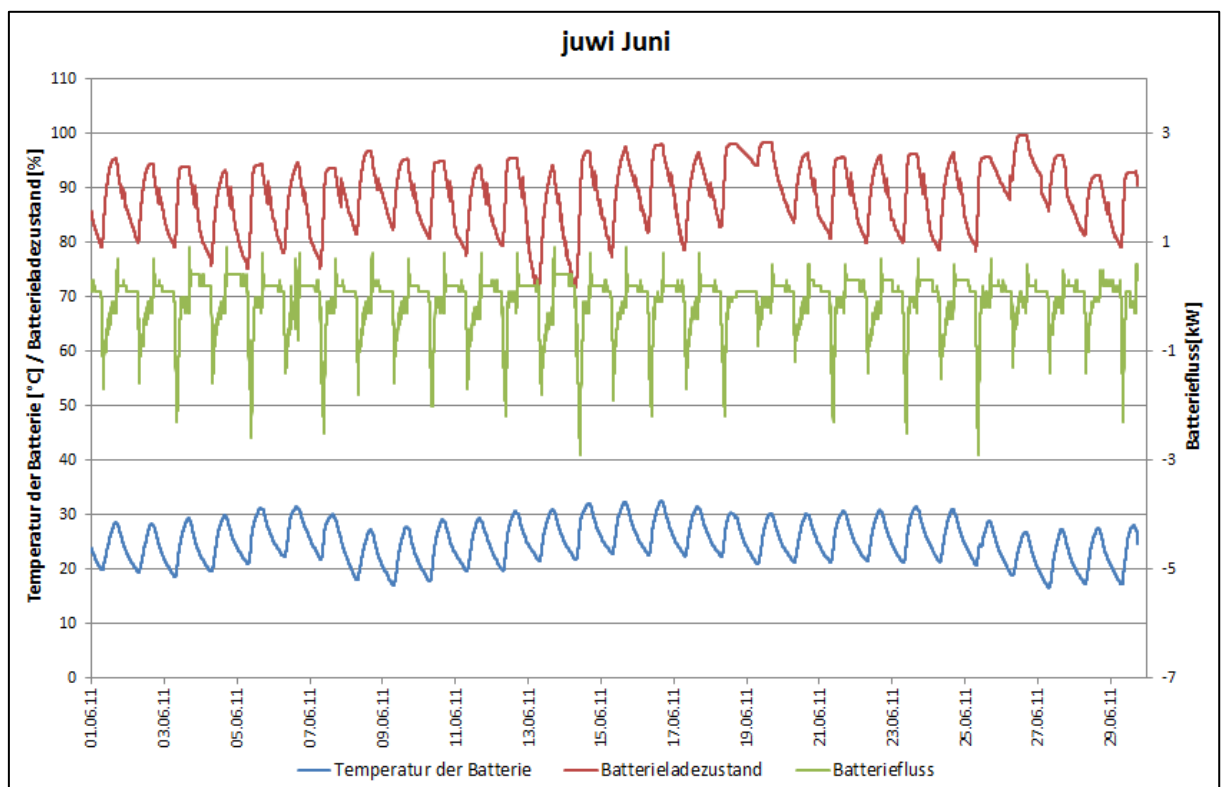


Abbildung H-8: Betriebsdaten der Photovoltaikanlage im Juni 2011

I. Energiebilanz der gesamten Anlage

Tabelle I-9: Energiebilanz der Anlagen in Amarika

(orange= Mittelwert von den drei Monaten, gelb= Strahlungsdaten aus Akutsima)

Tage	I_{dm} [kWh/m²d]	potentielle Energie [kWh/d]	tatsächlich produzierte Energie [kWh/d]	Energiebedarf Anlagen [kWh/d]		Energiebilanz [kWh/d]
				ProAqua	Fraunhofer	
01.05.2011	4,7	662,36	52,71	24	24,6	4,11
02.05.2011	6,0	852,47	67,84	24	24,6	19,24
03.05.2011	6,2	875,76	69,69	25	24,6	20,09
04.05.2011	6,2	883,56	70,31	24	24,6	21,71
05.05.2011	6,2	877,93	69,86	24	24,6	21,26
06.05.2011	5,8	825,40	65,68	25	24,6	16,08
07.05.2011	5,5	780,48	62,11	25,7	24,6	11,81
08.05.2011	6,1	867,65	69,05	24	24,6	20,45
09.05.2011	6,2	882,74	70,25	24	24,6	21,65
10.05.2011	5,8	818,17	65,11	21	24,6	19,51
11.05.2011	5,1	717,68	57,11	24	24,6	8,51
12.05.2011	5,8	817,45	65,05	24	24,6	16,45
13.05.2011	6,3	895,05	71,23	25	24,6	21,63
14.05.2011	6,3	895,60	71,27	24	24,6	22,67
15.05.2011	6,2	877,57	69,83	27	24,6	18,23
16.05.2011	5,8	819,07	65,18	28	24,6	12,58
17.05.2011	5,3	758,89	60,39	27	24,6	8,79
18.05.2011	5,3	750,09	59,69	28	24,6	7,09
19.05.2011	5,8	818,41	65,13	25	24,6	15,53
20.05.2011	6,1	863,55	68,72	27	24,6	17,12
21.05.2011	6,0	854,47	68,00	27	24,6	16,40
22.05.2011	5,9	840,65	66,90	25	24,6	17,30
23.05.2011	5,9	838,18	66,70	24	24,6	18,10
24.05.2011	5,9	841,22	66,94	24	24,6	18,34
25.05.2011	6,0	854,51	68,00	24	24,6	19,40
26.05.2011	6,0	857,76	68,26	25,7	24,6	17,96
27.05.2011	6,0	848,08	67,49	24	24,6	18,89
28.05.2011	5,7	815,71	64,91	25	24,6	15,31
29.05.2011	6,0	846,14	67,33	24	24,6	18,73
30.05.2011	6,1	872,57	69,44	27	24,6	17,84
31.05.2011	6,1	873,11	69,48	25	24,6	19,88
01.06.2011	6,1	866,42	68,95	25	24,6	19,35
02.06.2011	6,1	867,56	69,04	24,2	24,6	20,24
03.06.2011	6,1	864,37	68,78	27	24,6	17,18
04.06.2011	5,7	809,16	64,39	28	24,6	11,79
05.06.2011	5,6	791,78	63,01	25	24,6	13,41
06.06.2011	5,6	791,42	62,98	25	24,6	13,38
07.06.2011	6,2	873,45	69,51	24	24,6	20,91
08.06.2011	6,3	887,91	70,66	25	24,6	21,06
09.06.2011	6,1	861,53	68,56	25	24,6	18,96
10.06.2011	5,9	841,91	67,00	24	24,6	18,40
11.06.2011	5,8	829,72	66,03	25	24,6	16,43
12.06.2011	5,8	828,34	65,92	24	24,6	17,32

Tage	I _{dm} [kWh/m²d]	potentielle Energie [kWh/d]	tatsächlich produzierte Energie [kWh/d]	Energiebedarf Anlagen [kWh/d]		Energiebilanz [kWh/d]
				ProAqua	Fraunhofer	
13.06.2011	5,7	803,89	63,97	27	24,6	12,37
14.06.2011	5,3	753,91	59,99	25	24,6	10,39
15.06.2011	5,4	770,79	61,34	25,7	24,6	11,04
16.06.2011	5,7	808,04	64,30	25,7	24,6	14,00
17.06.2011	5,5	786,16	62,56	25,7	24,6	12,26
18.06.2011	5,5	778,10	61,92	25,7	24,6	11,62
19.06.2011	5,5	775,94	61,75	25,7	24,6	11,45
20.06.2011	5,4	768,07	61,12	25,7	24,6	10,82
21.06.2011	5,4	773,67	61,57	25,7	24,6	11,27
22.06.2011	5,5	785,60	62,52	25,7	24,6	12,22
23.06.2011	5,4	772,18	61,45	25,7	24,6	11,15
24.06.2011	5,5	787,92	62,70	17	24,6	21,10
25.06.2011	5,8	828,86	65,96	25,7	24,6	15,66
26.06.2011	6,1	859,53	68,40	25,7	24,6	18,10
27.06.2011	6,0	847,79	67,46	25,7	24,6	17,16
28.06.2011	5,9	837,98	66,68	25,7	24,6	16,38
29.06.2011	5,8	821,08	65,34	25,7	24,6	15,04
30.06.2011	5,8	821,35	65,36	17	24,6	23,76
01.07.2011	5,9	832,68	66,26	27	24,6	14,66
02.07.2011	5,6	801,96	63,82	29	24,6	10,22
03.07.2011	5,9	833,60	66,34	27	24,6	14,74
04.07.2011	5,3	756,83	60,23	27	24,6	8,63
05.07.2011	5,1	723,39	57,57	28	24,6	4,97
06.07.2011	5,1	721,60	57,42	26	24,6	6,82
07.07.2011	5,0	706,93	56,26	28	24,6	3,66
08.07.2011	5,6	797,68	63,48	27	24,6	11,88
09.07.2011	5,0	703,76	56,00	27	24,6	4,40
10.07.2011	5,4	765,65	60,93	27	24,6	9,33
11.07.2011	5,5	787,25	62,65	27	24,6	11,05
12.07.2011	5,8	822,97	65,49	27	24,6	13,89
13.07.2011	5,7	810,05	64,46	27	24,6	12,86
14.07.2011	5,7	807,36	64,25	27	24,6	12,65
15.07.2011	5,7	808,25	64,32	27	24,6	12,72
16.07.2011	5,7	807,54	64,26	27	24,6	12,66
17.07.2011	6,0	847,88	67,47	27	24,6	15,87
18.07.2011	6,1	861,81	68,58	27	24,6	16,98
19.07.2011	5,6	790,38	62,90	27	24,6	11,30
20.07.2011	5,4	768,31	61,14	27	24,6	9,54
21.07.2011	5,4	771,18	61,37	27	24,6	9,77
22.07.2011	4,9	697,89	55,54	27	24,6	3,94
23.07.2011	4,7	674,40	53,67	26	24,6	3,07
24.07.2011	4,9	692,09	55,07	27	24,6	3,47
25.07.2011	6,4	910,20	72,43	30	24,6	17,83
26.07.2011	6,3	889,62	70,79	27	24,6	19,19
27.07.2011	5,3	754,87	60,07	26	24,6	9,47
28.07.2011	5,4	761,58	60,60	27	24,6	9,00
29.07.2011	6,1	873,18	69,49	28	24,6	16,89
30.07.2011	5,9	838,99	66,76	27	24,6	15,16
31.07.2011	5,2	744,18	59,22	27	24,6	7,62

J. Plateaudauer

Tabelle J-10: Plateaudauer

Datum	Uhrzeit Anfang Plateau	Uhrzeit Ende Plateau	Dauer des Plateaus [h]
01.05.2011	-	-	00:00
02.05.2011	11:51	16:52	05:01
03.05.2011	-	-	00:00
04.05.2011	11:25	16:56	05:31
05.05.2011	-	-	00:00
06.05.2011	11:20	16:46	05:26
07.05.2011	-	-	00:00
08.05.2011	11:06	16:53	05:47
09.05.2011	-	-	00:00
10.05.2011	11:19	16:32	05:13
11.05.2011	-	-	00:00
12.05.2011	12:21	16:40	04:19
13.05.2011	-	-	00:00
14.05.2011	11:19	16:54	05:35
15.05.2011	-	-	00:00
16.05.2011	11:24	16:41	05:17
17.05.2011	-	-	00:00
18.05.2011	11:05	16:38	05:33
19.05.2011	-	-	00:00
20.05.2011	10:56	16:54	05:58
21.05.2011	-	-	00:00
22.05.2011	10:51	17:00	06:09
23.05.2011	-	-	00:00
24.05.2011	09:48	20:11	10:23
25.05.2011	08:44	19:57	11:13
26.05.2011	08:07	17:35	09:28
27.05.2011	-	-	00:00
28.05.2011	-	-	00:00
29.05.2011	10:53	16:50	05:57
30.05.2011	-	-	00:00
31.05.2011	10:44	16:55	06:11
01.06.2011	13:38	16:46	03:08
02.06.2011	13:24	16:45	03:21
03.06.2011	09:58	16:56	06:58
04.06.2011	-	-	00:00
05.06.2011	11:33	16:34	05:01
06.06.2011	-	-	00:00
07.06.2011	10:49	16:55	06:06
08.06.2011	12:17	16:57	04:40
09.06.2011	12:47	16:48	04:01
10.06.2011	10:01	16:54	06:53
11.06.2011	-	-	00:00
12.06.2011	10:34	16:45	06:11
13.06.2011	-	-	00:00
14.06.2011	11:43	16:42	04:59
15.06.2011	-	-	00:00
16.06.2011	10:52	17:01	06:09
17.06.2011	-	-	00:00
18.06.2011	10:40	17:47	07:07
19.06.2011	09:22	16:44	07:22

Datum	Uhrzeit Anfang Plateau	Uhrzeit Ende Plateau	Dauer des Plateaus [h]
20.06.2011	-	-	00:00
21.06.2011	10:33	16:47	06:14
22.06.2011	-	-	00:00
23.06.2011	10:59	16:42	05:43
24.06.2011	-	-	00:00
25.06.2011	10:23	17:41	07:18
26.06.2011	10:26	16:59	06:33
27.06.2011	13:04	16:41	03:37
28.06.2011	12:29	16:57	04:28
29.06.2011	09:47	17:20	07:33

K. Energiereserven

Tabelle K-11: Berechnung der Energiereserven

(GS= Globalstrahlung, ER= Energiereserven, EV= Energieverbräuche)

Datum	Plateau- dauer [h]	GS Plateau [kWh/m²]	pot. ER [kWh]	tats. ER [kWh]	EV ProAqua [kWh]	EV Fraunhofer [kWh]	EV Pumpe [kWh]	ER [kWh]	Bemerkung
1.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
2.Mai	5,02	2,96	420,72	37,34	12,54	8,03	5,02	11,75	
3.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
4.Mai	5,52	3,57	507,63	45,05	13,79	8,83	5,52	16,92	
5.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
6.Mai	5,43	3,15	447,09	39,68	13,58	8,69	5,43	11,97	
7.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
8.Mai	5,78	3,79	538,86	47,82	14,46	9,25	5,78	18,33	
9.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
10.Mai	5,22	3,21	456,31	40,50	13,04	8,35	5,22	13,89	
11.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
12.Mai	4,32	2,30	326,74	29,00	10,79	6,91	4,32	6,98	
13.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
14.Mai	5,58	3,69	524,09	46,51	13,96	8,93	5,58	18,04	
15.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
16.Mai	5,28	3,32	471,74	41,87	13,21	8,45	5,28	14,92	
17.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
18.Mai	5,55	3,01	427,78	37,96	13,88	8,88	5,55	9,66	
19.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
20.Mai	5,97	3,98	565,40	50,18	14,92	9,55	5,97	19,75	
21.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
22.Mai	6,15	3,91	555,82	49,33	15,38	9,84	6,15	17,96	
23.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
24.Mai	10,38	4,58	650,08	57,69	25,96	16,61	10,38	4,74	
25.Mai	11,22	-	-	-	-	-	-	0,00	Anlage nicht in Betrieb
26.Mai	9,47	-	-	-	-	-	-	0,00	Anlage nicht in Betrieb
27.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	Anlage nicht in Betrieb
28.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	Anlage nicht in Betrieb
29.Mai	5,95	-	-	-	-	-	-	0,00	Anlage nicht in Betrieb
30.Mai	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	Anlage nicht in Betrieb
31.Mai	6,18	-	-	-	-	-	-	0,00	Anlage nicht in Betrieb
1.Juni	3,13	1,59	225,09	19,98	7,83	5,01	3,13	4,00	
2.Juni	3,35	1,77	252,05	22,37	8,38	5,36	3,35	5,28	
3.Juni	6,97	4,67	663,49	58,88	17,42	11,15	6,97	23,35	
4.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
5.Juni	5,02	3,08	437,15	38,80	12,54	8,03	5,02	13,21	
6.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
7.Juni	6,10	4,09	580,84	51,55	15,25	9,76	6,10	20,44	
8.Juni	4,67	2,81	398,69	35,38	11,67	7,47	4,67	11,58	
9.Juni	4,02	2,29	325,33	28,87	10,04	6,43	4,02	8,39	

Datum	Plateau- dauer [h]	GS Plateau [kWh/m²]	pot. ER [kWh]	tats. ER [kWh]	EV ProAqua [kWh]	EV Fraunhofer [kWh]	EV Pumpe [kWh]	ER [kWh]	Bemerkung
10.Juni	6,88	4,54	645,12	57,25	17,21	11,01	6,88	22,15	
11.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
12.Juni	6,18	4,00	567,77	50,39	15,46	9,89	6,18	18,85	
13.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
14.Juni	4,98	2,82	399,90	35,49	12,46	7,97	4,98	10,08	
15.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
16.Juni	6,15	2,00	284,28	25,23	15,38	9,84	6,15	0,00	Zu viele Daten fehlen
17.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
18.Juni	7,12	4,95	702,86	62,38	17,79	11,39	7,12	26,08	GS-Werte von Akutsima
19.Juni	7,37	4,66	661,15	58,68	18,42	11,79	7,37	21,11	
20.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
21.Juni	6,23	3,85	546,21	48,48	15,58	9,97	6,23	16,69	
22.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
23.Juni	5,72	3,51	498,04	44,20	14,29	9,15	5,72	15,05	
24.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	
25.Juni	7,30	4,25	603,27	53,54	18,25	11,68	7,30	16,31	
26.Juni	6,55	4,37	620,39	55,06	16,38	10,48	6,55	21,65	
27.Juni	3,62	2,04	289,23	25,67	9,04	5,79	3,62	7,22	
28.Juni	4,47	2,55	361,89	32,12	11,17	7,15	4,47	9,34	
29.Juni	7,55	4,65	660,99	58,66	18,88	12,08	7,55	20,16	
30.Juni	0,00	-	-	-	-	-	-	0,00	

Literaturverzeichnis

- Baehr, D. & Stephan, K. (2010). *Wärme- und Stoffübertragung*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer- Verlag.
- Beck, J. (2011). *Bachelor Thesis: Untersuchung des solarenergetischen Betriebs einer Umkehrosmoseanlage in Namibia*. Darmstadt: TU Darmstadt, Institut IWAR.
- Bergmann, L. & Schaefer C. (2001). *Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 7. Erde und Planeten*. 2. Auflage. Berlin, New York: De Gruyter.
- Brenda, M. (kein Datum). *CUVEwaters – Grundwasserentsalzung*. Abgerufen am 29.03.2012 von: http://www.iwar.tu-darmstadt.de/wv/forschung_5/wasserversorgung/projekte_8/projekte_12.de.jsp
- Brendel, T. (2003). *Dissertation: Solare Meerwasserentsalzungsanlagen mit mehrstufiger Verdunstung*. Bochum: Fakultät für Maschinenbau der Ruhr- Universität Bochum. Abgerufen am 29.03.2012 von: <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/BrendelThomas/diss.pdf>
- Center for Desalination Research and Capacity Building e. V. (kein Datum). Abgerufen am 19.04.2011 von: http://www.ce-des.de/index.php?article_id=25&clang=0
- CuveWaters (2010). *Factsheet on groundwater desalination pilot plants*.
- Eisold Dr., J. & Benzinger Dr.,C. (Oktober 2010). *From concept to tap. Integrated Water Resources Management in Northern Namibia*. Institute for Social-Ecological Research (ISOE) GmbH, Frankfurt/Main, Deutschland.
- Feingerätebau K. Fischer GmbH (2004/2005). *Fischer Produktdatenblatt: Sternpyranometer. Drehbach*. Abgerufen am 29.03.2012 von: <http://www.fischer-barometer.de/meteoclima/index.htm>
- Fischer eco solutions Germany (2011). *Wärme effizienter wandeln. Umfassende Primärenergienutzung durch Polygeneration: Wärmeaustausch, Meerwasserentsalzung, Absorptionskälte*. Abgerufen am 24.04.2012 von: http://www.fischer-group.com/de/download/D_FES_BRO_eco_solutions_Rev01_D.pdf
- Hering, E., Martin, R. & Stohrer, M. (2007). *Physik für Ingenieure*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Jahn Dr., T. (24. 11 2010). *CuveWaters Impressions*. (Institute for Social-Ecological Research (ISOE) GmbH) Abgerufen am 28. 03.2012 von: <http://www.cuvewaters.net/impressions.htm>
- Jahn Dr., T. (11. 10 2010). *CuveWaters Project Background*. (Institute for Social-Ecological Research (ISOE) GmbH) Abgerufen am 28. 03.2012 von: <http://www.cuvewaters.net/project/project.htm>
- juwi Holding AG (2010a). *Projektbeschreibung Amarika*.

juwi Holding AG (kein Datum, b). *Sunny Island 5048 Installations- und Bedienungsanleitung.* Technische Beschreibung. Version 2.2.

Koschikovski Dr., J. (10.08.2011a). *VDL Berufsverband – Mit Sonnenenergie Meerwasser entsalzen*: Abgerufen am 27.03.2012 von:
http://www.vdl.de/VDL_Journal_online/schwerpunkte/2011/04/Artikel_MitSonnenenergieMeerwasserentsalzen.php

Koschikovski Dr., J. (2011b). *Entwicklung von energieautark arbeitenden Wasserentsalzungsanlagen auf Basis der Membrandestillation*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Krug von Nidda, A. (kein Datum). *CuveWaters – Integriertes Wasserressourcen- Management in Namibia*. Abgerufen am 29.03.2012 von:
<http://www.isoe.de/projekte/aktuelle-projekte/wasserrecourcen-und-landnutzung/cuvewaters/>

Krüger, W. (März 2012). *Auswertung der Sunny Island- Daten 2011 – CUVEwaters, Amarika, Namibia*. Juwi Solar GmbH.

Mutschmann, J. & Stimmelmayer, F. (2007). *Taschenbuch der Wasserversorgung*. Wiesbaden: Vieweg+ Teubner Verlag.

Müller, H.C. (2009). *Dissertation: Theoretische und praktische Untersuchung einer mehrstufigen solarthermischen Kleinanlage zur Meer- und Brackwasserentsalzung*. Aachen: RWTH Aachen. Abgerufen am 28.03.2012 von:
http://www.hc-solar.de/Mueller_Christoph.pdf

NASA (kein Datum). *Surface meteorology and Solar Energy*. Abgerufen am 28.03.2012 von A renewable energy resource web site:
<http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/homer.cgi>

Quasching, V. (Juni 2001). *Sonnenenergie: Unstete Plangröße – Wo Sie Daten für die Sonneneinstrahlung finden*. Abgerufen am 29.03.2012 von:
<http://www.volker-quasching.de/artikel/solarstrahlung1/index.php>

Rautenbach, R. (1997). *Membranverfahren. Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*. Heidelberg: Springer-Verlag.

Schröder, T. (2012). *Bachelor Thesis: Untersuchung des solarenergetischen Betriebs einer Mehrfachverdampfungsanlage in Namibia*. Darmstadt: TU Darmstadt, Institut IWAR.

Schwarzer, Prof. Dr. K. (2011). *Konventionelle und solare Trinkwassererzeugung*. Ingenieurbüro für Energie und Umwelttechnik. Abgerufen am 28.04.2012 von:
http://www.innovationsnetzwerk-region-hildesheim.de/fileadmin/pdf/V5_111123_Konventionelle___solare_Trinkwassererzeugung_Scharzer.pdf

SolarGIS (kein Datum). Abgerufen am 27.03.2012 von:

http://www.solargis.info/doc/_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Africa-and-Middle-East-de.png,
http://www.solargis.info/doc/_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Europe-en.png

Stenzel, P. (2012). *Potentiale der Osmose zur Erzeugung und Speicherung von Elektrizität*. Berlin: LIT Verlag.

Stroppe, H. u.a.(2009). *Physik. Beispiele und Aufgaben 1. Mechanik- Wärmelehre*. München: Carl Hanser Verlag

TU Clausthal (2010). *Simulation einer solaren Meerwasserentsalzungsanlage*. Clausthal: TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik. Abgerufen am 18.04.2012 von:
http://www.ievb.tu-clausthal.de/fileadmin/Downloads/Fachpraktika/Skripte/SKRIPT_IEVB_FP_MWE_SS2010.pdf

Watter, H. (2011). *Regenerative Energiesysteme. Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele aus der Praxis* (2. Auflage Ausg.). Wiesbaden: Vieweg+ Teubner Verlag.

Wesselak, V., & Schabbach, T. (2009). *Regenerative Energietechnik*. Heidelberg: Springer-Verlag.

Internetquellen:

<http://www.africandesk.com/namibia-laenderinformationen.html> (Abgerufen am 28.3.2011)

<http://www.thur.de/philo/bilder/nano/dotierung.gif> (Abgerufen am 11.04.2012)

http://www.filmscanner.info/Bilder/CCD_02.gif (Abgerufen am 11.04.2012)

Eidesstattliche Erklärung

Bachelorthesis von:

Frau Nadja Dohmen

Erklärung zur Bachelorthesis gemäß § 23, Abs.7 APB

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorthesis ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den

Nadja Dohmen